

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Daiva LEVINSKAITĖ

**ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ
IR ĮTEMPIŲ TYRIMAS GEODEZINIAIS
METODAIS (BALTIJOS REGIONO
PAVYZDŽIU)**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algimantas ZAKAREVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

Konsultantas

habil. dr. Saulius ŠLIAUPA (Gamtos tyrimų centras, fiziniai mokslai, geologija – 05P).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2066-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-365-1

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012

© Daiva Levinskaitė, 2012

daiva.levinskaite@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Daiva LEVINSKAITĖ

**RESEARCH OF EARTH'S CRUST STRAINS
AND STRESSES BY GEODETIC METHOD
(BALTIC REGION EXAMPLE)**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Algimantas ZAKAREVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Consultant

Dr Habil Saulius ŠLIAUPA (Nature Research Center, Physical Sciences, Geology – 05P).

Reziumė

Disertacijos tikslas – ištirti dabartines Žemės plutos deformacijas ir įtempius Baltijos regione, nustatyti deformacijų rodiklių sklaidos dėsningumus.

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius: 1) Parengti patobulintą metodiką dabartinių Žemės plutos judesių rodiklių nustatymui, įvertinant Žemės formos sferoidiškumą; 2) Taikant parengtą metodiką, įvertinti dabartinių Žemės plutos judesių charakteristikas; 3) Parengti apskaičiuotų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimo metodiką; 4) Taikant parengtą metodiką, atlikti nustatytų dabartinių Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo bei patikimumo analizę; 5) Ištirti dabartinių Žemės plutos deformacijų dėsningumus ir sklaidos ypatumus.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados.

Įvade pagrindžiama tiriamoji problema, apibrėžiamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pateikiami ginamieji disertacijos teiginiai, pristatomos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose, aprašoma disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje nagrinėta mokslinė literatūra Žemės plutos judesių nustatymo pagal kartotinių geodezinių matavimų duomenis klausimais. Suformuluoti probleminiai tyrimų klausimai bei uždaviniai darbo tikslui pasiekti.

Antrajame skyriuje išnagrinėta dabartinių Žemės plutos deformacijų rodiklių bei įtempių įvertinimo metodika pagal geodezinių matavimų duomenis. Pateiktas naujas nustatytų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimo metodas. Parengta patobulinta Žemės plutos deformacijų rodiklių nustatymo, įvertinant į Žemės formos sferoidiškumą, metodika.

Trečiajame skyriuje pateikti Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimų, atliktų pagal antrajame skyriuje rekomenduotą metodiką, rezultatai.

Ketvirtajame skyriuje įvertinti Žemės plutos deformacijų rodiklių ir įtempių pokyčių kaitos Baltijos regione dėsningumai. Tyrimų rezultatai palyginti su kitų tyrėjų duomenimis.

Bendrosiose išvadose pateikti apibendrinti tyrimų rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: penki – tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose periodiniuose žurnaluose, vienas – tarptautinės konferencijos medžiagoje, vienas – kitame leidinyje, perskaityti 8 pranešimai konferencijose.

Abstract

The aim of the work is to establish values of current Earth's crust strains and geodynamic stresses in the Baltic region, analyse their spread.

The following tasks need to be solved to achieve research objective: 1) Work up an improved technique for evaluation of current Earth's crust movement values keeping in mind spheroidal shape of the Earth; 2) Applying developed technique make an evaluation of Earth's crust movement characteristics; 3) Prepare a method of accuracy appraisal of calculated Earth's crust strains values; 4) Applying this technique conduct an analysis of accuracy and reliability of current established Earth's crust strains values; 5) Examine regularities of current Earth's crust strains and their dispersion characteristics.

Introduction grounds the research problem, defines problem topicality, states the research objective and tasks, describes scientific novelty of the research, provides theses hypotheses, presents author's publications and reports at conferences, and describes structure of the thesis.

The first section analyses scientific literature of Earth's crust movement determination according to repeated geodetic measurement data. Topical research issues and tasks are stated to achieve the research objective.

The second section examines current technique of evaluation of Earth's crust strains values and stresses based on geodetic measurement data. New method of accuracy appraisal of Earth's crust strains values is provided. Improved evaluation technique of Earth's crust strains values is worked up keeping in mind spheroidal shape of the Earth.

The third section provides research results of Earth's crust strains and stresses conducted based on the technique recommended in the second section.

The fourth section considers regularities of Earth's crust strains values and changes of stresses in the Baltic region. Research results are compared with the data of other researchers.

Overall conclusions present generalized research results.

The author published 7 articles on the issues of the research made, i.e. five articles were published in the journals referred at the international data bases; one article were published in the material referred at the international conferences and one more articles were published in the other publication, besides, there were made 8 presentations at the conferences.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodai	3
Mokslinis darbo naujumas	3
Praktinė darbo vertė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
1. ŽEMĖS PLUTOS JUDESIŲ TYRIMŲ APŽVALGA	7
1.1. Žemės plutos judesių tyrimų istorinė apžvalga	7
1.2. Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimų apžvalga	11
1.3. Žemės plutos judesių tyrimų Baltijos regione apžvalga	16
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	22

2. ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIŲ TYRIMO METODIKA.....	25
2.1. Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas taikant geodezinių matavimų duomenis.....	25
2.1.1. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas	26
2.1.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas	31
2.2. Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas	36
2.2.1. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas.....	37
2.2.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas	44
2.3. Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčių nustatymas	48
2.3.1. Erdvinių Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčių nustatymas	49
2.3.2. Horizontaliųjų Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčių nustatymas ...	52
2.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių bei įtempių pokyčių įvertinimas, atsižvelgiant į Žemės formos sferiškumą.....	54
2.4.1. Žemės paviršiaus sferoidiškumo įvertinimo metodologiniai principai	55
2.4.2. Žemės paviršiaus aproksimavimas trikampiais plokščiaisiais baigtiniais elementais	56
2.4.3. Baigtinių elementų lokalsiosios horizontalinės koordinatės sistemos	60
2.4.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių bei geodinaminių įtempių pokyčių transformavimas iš globaliosios į lokaliąją koordinatės sistemą.....	64
2.5. Antrojo skyriaus išvados	65
3. ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIŲ TYRIMO BALTIJOS REGIONE REZULTATAI	67
3.1. Tyrimų objektas ir pradiniai duomenys	67
3.1.1. Nuolat veikiančių GPS stočių koordinatės pokyčių analizė	68
3.1.2. Žemės paviršiaus modeliavimas plokščiaisiais baigtiniais elementais ir lokaliųjų koordinatės skaičiavimas	73
3.2. Erdvinių Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo rezultatai.....	75
3.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo rezultatai	80
3.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo ir patikimumo įvertinimas.....	86
3.5. Žemės plutos judesių tyrimo Lietuvos teritorijoje rezultatai	89
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	90
4. ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIŲ TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ.....	93
4.1. Žemės plutos deformacijų ir įtempių skaidos ypatumai Baltijos regione	93
4.2. Gautųjų rezultatų palyginimas su kitų tyrėjų duomenimis	105
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados	106
BENDROSIOS IŠVADOS	109
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	111
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	123

PRIEDAI.....	125
A priedas. Matavimai <i>EUREF GPS</i> tinklo stotyse	125
B priedas. Punktų erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės	127
C priedas. Punktų horizontalinės koordinatės ir standartinis nuokrypis	132
D priedas. Žemės plutos judesių tyrimo Lietuvos teritorijoje rezultatai.....	134

Contents

INTRODUCTION	1
Topically of the problem	1
Relevance of work	2
Research object.....	2
Research objective.....	2
Research tasks	3
Research methods.....	3
Scientific novelty of research	3
Practical importance of research.....	3
Defended propositions.....	4
Scope of research.....	4
Structure of research.....	5
1. REVIEW OF EARTH'S CRUST MOVEMENTS RESEARCHES.....	7
1.1. Historical review of Earth's crust movement researches.....	7
1.2. Review of current Earth's crust movement researches.....	11
1.3. Earth's crust movement researches in Baltic region.....	16
1.4. First section conclusions and formulation of thesis tasks	22

2. EVALUATION TECHNIQUE OF EARTH'S CRUST STRAINS AND STRESSES RESEARCH	25
2.1. Evaluation of Earth's crust strains according to geodetic measurement data	25
2.1.1. Appraisal of three-dimensional Earth's crust strains values	26
2.1.2. Appraisal of horizontal Earth's crust strains values.....	31
2.2. Accuracy appraisal of Earth's crust strains values	36
2.2.1. Accuracy appraisal of three-dimensional Earth's crust strains values	37
2.2.2. Accuracy appraisal of horizontal Earth's crust strains values.....	44
2.3. Accuracy of changes of Earth's crust geodynamic stresses	48
2.3.1. Accuracy of three-dimensional changes of Earth's crust geodynamic stresses	49
2.3.2. Accuracy of horizontal changes of Earth's crust geodynamic stresses.....	52
2.4. Evaluation of Earth's crust strains and stress values considering spherical shape of the Earth	54
2.4.1. Methodological principles of Earth's surface spheroidal evaluation	55
2.4.2. Earth surface approximation by triangle finite elements	56
2.4.3. Local horizontal coordinate system of finite elements	60
2.4.4. Transformation of changes of calculated deformations and stresses from global into a local coordinate system.....	64
2.5. Second section conclusions	65
3. RESEARCH RESULTS OF EARTH'S CRUST STRAINS AND STRESSES	67
3.1. Research objective and initial data	67
3.1.1. Analysis of coordinates' change of continuous duty <i>GPS</i> stations	68
3.1.2. Earth surface modeling with the flat finite elements and calculation of local coordinates.....	73
3.2. Results of three-dimensional Earth's crust strains and stresses research in the Baltic region	75
3.3. Results of horizontal Earth's crust strains and stresses research in the Baltic region.....	80
3.4. Accuracy and reliability appraisal of Earth's crust deformation values in the Baltic region	86
3.5. Results of Earth's crust movements research in territory of Lithuania.....	89
3.4. Third section conclusions	90
4. ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS OF EARTH'S CRUST STRAINS AND STRESSES	93
4.1. Features of the dispersion of the Earth's crust strains and stresses	93
4.2. Inbox comparison of the results with the data of other researches	105
4.3. Fourth section conclusion	106
GENERAL CONCLUSIONS	109
REFERENCES	111

LIST OF AUTHOR PUBLICATIONS RELATED TO THE TOPIC OF DISSERTATION REFERENCES	123
ANNEXES	125
Annex A. Measurements on <i>EUREF GPS</i> network stations	125
Annex B. Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates of points	127
Annex C. Horizontal coordinates and standart deviation of points	132
Annex D. Results of Earth's crust movements research in territory of Lihuania	134

Ivadas

Problemos formulavimas

Geodeziniai matavimai susieti su viršutinėje Žemės plutos dalyje įrengtais geodeziniais ženklais, kurių erdvinė padėtis nustatoma bendrojoje Žemės geodezinių koordinacių sistemoje. Žemė nėra statinis, nekintantis kūnas. Žemės gelmėse vykstantys geodinaminiai procesai sukelia nepertraukiamus Žemės plutos horizontalius ir vertikalius judesius. Dėl Žemės plutos judesių geodeziniai ženklai, einant laikui, keičia erdvinę padėtį, todėl po tam tikro laiko šie ženklai praranda reikiamą tikslumą. Geodezinių tinklų tinkamumo eksploatuoti laikotarpį lemia ne tik geodezinio tinklo, kaip inžinerinio įrenginio, fizinis nusidėvėjimas, bet ir vykstantys dabartiniai geodinaminiai procesai, jų intensyvumas.

Pagrindinis būdas skaitmeniniams dabartinių Žemės plutos judesių rodikliams įvertinti yra kartotiniai geodeziniai matavimai. Sisteminant ir apdorojant kartotinių geodezinių matavimų duomenis, sudaromi objektyviais duomenimis pagrįsti Žemės plutos judesių modeliai. Taip gaunamas abipusis ryšys tarp tiriamojo proceso ir geodinaminiais matavimais pagrįstų tyrimo metodų, kurie leidžia ne tik patikimai nustatyti Žemės plutos judesius, bet ir gerinti geodezinių matavimų kokybę.

Tobulėjant kosminės geodezijos metodais paremtų geodezinių matavimų technologijoms, atsirado naujos galimybės pagerinti geodinaminių tyrimų, remiantis geodeziniais matavimais, tikslumą, išplėsti tyrimus į dideles teritorijas, nepertraukiamai stebėti vykstančius geodinaminius procesus. Tačiau kartu su naujų matavimų technologijų diegimu, tyrimų išplėtimu į dideles teritorijas, iškilo naujų problemų atliekant matavimų rezultatų sisteminimą bei apdorojimą, Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimą, Žemės plutos deformacijų įvertinimo modelių sudarymą, įvertinant Žemės paviršiaus sferoidiškumą.

Darbo aktualumas

Norint užtikrinti geodezinių tinklų tikslumą, numatyti techniškai pagrįstus eksploatavimo laikotarpius, reikalingos detalios žinios apie šiuo metu vykstančius dabartinius Žemės plutos judesius. Dabartinius geodinaminius procesus reikia įvertinti nustatant sąsajas tarp geodezinių koordinačių ir aukščių sistemų, sudarant geoido modelius.

Žemės plutos judesių tyrimai aktuali tema ne tik geodezijai, bet ir kitiems žemės mokslams – geologijai, geofizikai, seismologijai. Dabartinių geodinaminių tyrimų rezultatai taikomi teritorijų seisminio pavojingumo prognozėms, Žemės plutos geodinaminių įtempių laukų parametru įvertinimui, taip pat yra papildomi duomenys naudingųjų iškasenų telkinių paieškoms, sudėtingų bei ekologiškai pavojingų statinių vietos parinkimui. Geodinaminių procesų sklaidos ypatumai yra susiję su teritorijos geologinės sandaros ypatybėmis. Nustatytų Žemės plutos judesių rodiklių sklaidos palyginimas su teritorijos geologinės sandaros ypatumais leidžia spręsti ne tik apie gautų rezultatų patikimumą, bet ir atlikti kompleksinę Žemės plutos judesių analizę. Todėl dabartinių Žemės plutos judesių tyrimus galima laikyti tarpkryptiniais, aktualiais ne tik vienai mokslo sričiai bei mokslo kryptiai.

Tyrimų objektas

Dabartinės Žemės plutos deformacijos ir įtempiai Baltijos regione.

Darbo tikslas

Ištirti dabartines Žemės plutos deformacijas ir įtempius Baltijos regione, nustatyti deformacijų rodiklių sklaidos dėsningumus.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Parengti patobulintą metodiką dabartinių Žemės plutos judesių rodiklių nustatymui, įvertinant Žemės formos sferoidiškumą.
2. Taikant parengtą metodiką, įvertinti dabartinių Žemės plutos judesių charakteristikas.
3. Parengti apskaičiuotų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių tikslumo įvertinimo metodiką.
4. Taikant parengtą metodiką, atlikti nustatytų dabartinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių tikslumo bei patikimumo analizę.
5. Ištirti dabartinių Žemės plutos deformacijų dėsningumus ir sklaidos ypatumus.

Tyrimų metodai

Nuolat veikiančių *GPS* stočių matavimų rezultatų palyginamoji analizė, tenzorinė geodezinių matavimų analizė, baigtinių elementų metodas, matematinės statistikos metodai.

Mokslinis darbo naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie matavimų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Patobulinta Žemės plutos deformacijų bei įtempių įvertinimo metodika, pagrįsta sferoidinės Žemės formos modeliavimu plokščiaisiais baigtiniais elementais.
2. Patobulinta tenzorinės analizės būdu apskaičiuotų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių tikslumo įvertinimo metodika.
3. Gautos naujos Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės, jų patikimumas ir sklaida Baltijos regione.

Praktinė darbo vertė

Patobulinta Žemės plutos deformacijų tyrimo metodika, atsižvelgiant į Žemės formos sferoidiškumą bei nustatytų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių

tikslumo įvertinimas, gali būti taikomas atliekant dabartinius geodinaminius tyrimus didelėse teritorijose bei vertinant tyrimų rezultatų patikimumą.

Žemės plutos deformacijų rodikliai ir jų reikšmių sklaida Baltijos regione gali būti taikomi įvertinant geodezinių tinklų tikslumo kaitą einant laikui, sprendžiant geodezinių tinklų rekonstrukcijos bei plėtos klausimus, prognozuojant teritorijos seismingumą.

Ginamieji teiginiai

1. Žemės plutos deformacijų bei įtempių įvertinimo metodikoje turi būti atsižvelgiama į Žemės formos sferoidiškumą.
2. Metodikoje, pagal kurią nustatomos Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės, būtina įvertinti rodiklių tikslumo parametrus.
3. Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių Baltijos regione sklaida susijusi su bendruoju Žemės plutos poledynmetiniu kilimu Fenoskandijoje.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdintos 8 mokslinės publikacijos: penki – tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose periodiniuose žurnaluose (Zakarevičius *et al.* 2009, 2010, 2012; Levinskaitė 2009, 2012), vienas – tarptautinės konferencijos medžiagoje (Zakarevičius *et al.* 2011), du – kituose leidiniuose (Levinskaitė 2008, 2009).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti aštuoniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2011 m., Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2009 m., 2010 m. Vilniuje;
- Respublikinėje mokslo konferencijoje „Civilinė inžinerija ir geodezija“, 2008 m., 2009 m., 2010 m., Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Civilinė inžinerija ir geodezija“ 2011 m., Vilniuje.
- Mokslinėje konferencijoje „Aviacija‘ 2012“ 2012 m., Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 4 priedai.

Darbo apimtis yra 124 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 270 numeruotos formulės, 24 paveikslai ir 24 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 209 literatūros šaltinių.

Žemės plutos judesių tyrimų apžvalga

Skyriuje apžvelgta Žemės plutos judesių teorijos vystymosi istorija, išanalizuota mokslinė literatūra Žemės plutos judesių nustatymo pagal kartotinių geodezinių matavimų duomenis klausimais. Apžvelgti Žemės plutos judesių tyrimai bei šių tyrimų metodologiniai principai. Suformuluotos problemos Žemės plutos judesių įvertinime. Nustatytas darbo tikslas bei uždaviniai tikslui pasiekti.

1.1. Žemės plutos judesių tyrimų istorinė apžvalga

Žemė, kaip planeta, susiformavo prieš 4,5–4,6 milijardus metų (Gailius *et al.* 1994). Išskiriami trys pagrindiniai giluminės Žemės sandaros sluoksniai: branduolys, mantija bei Žemės pluta.

Žemės pluta yra išorinis tvirtas Žemės paviršiaus apvalkalas, suskaldytas į blokus – tektonines plokštes. Žemės plutos arba litosferos plokštės nėra stabilios. Veikiamos Žemės gelmėse vykstančiais procesais, jos nuolat juda tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimis.

Priklausomai nuo to, kokiomis kryptimis plokštės juda, po jų susidūrimo atsiranda tokie geologiniai dariniai kaip kalnai, salos, žemės drebėjimai,

ugnikalnių išsiveržimai, vandenynų duburių bei lovių formavimasis. Vienos plokštės judėdamos gali slysti viena palei kitą (transformacija), kitos – spausti viena kitą (subdukcija), dar kitos, judėdamos priešingomis kryptimis, gali tolti viena nuo kitos (divergencija). Tokie, nuo seniausių laikų vykstantys geologiniai reiškiniai, mokslininkams kėlė daug įvairių spėliojimų.

Dauguma jų manė, jog žemynai ir vandenynai, susiformavę mūsų planetoje, egzistuoja amžinai. Tačiau šie spėliojimai negalėjo paaiškinti, kaip ir kodėl susiformavo kalnai (Pirėnai, Tian Šanis, Kilimandžaras ir t. t.) ar jų grandinės (Alpės, Andai, Himalajai ir t. t.), kodėl visame Pasaulyje ugnikalnių išsiveržimai ar Žemės drebėjimai pasitaiko konkrečiose vietose.

Kad žemynai kažkada buvo sujungti, pirmasis įsivaizdavo kartografas ir geografas Abraomas Ortelius (1527–1598). Jis pastebėjo, kad Amerikos, Europos ir Afrikos žemynų pakrantės turi geometrinių sutapimų. Savo veikale „Thesaurus Geographicus“ jis teigė, kad Amerika dėl Žemės drebėjimų ir potvynių buvo atplėšta nuo Europos ir Afrikos.

Panašiai mąstė ir anglų politikas, filosofas ir eseistas Fransis Bekonas (1561–1626). Veikale „Novum Organum Scientiarum“, publikuotame 1620 m., atkreipė dėmesį, kad Naujojo ir Senojo pasaulių formos yra panašios, t. y., Atlanto vandenyje esančios Afrikos vakarinės pakrantės bei Ramiajame vandenyje esančios Pietų Amerikos pakrantės, šiaurinėse dalyse yra išplatėjusios, o pietinėse dalyse – susiaurėjusios (Kearey *et al.* 2009).

Vokiečių botanikas Aleksandras von Humboltas 1800 m. iškėlė žemynų dreifo teoriją. Jis, kaip ir prieš jį buvę mokslininkai, pastebėjęs Afrikos bei Pietų Amerikos panašumus, manė, jog šie žemynai kažkada buvo susijungę.

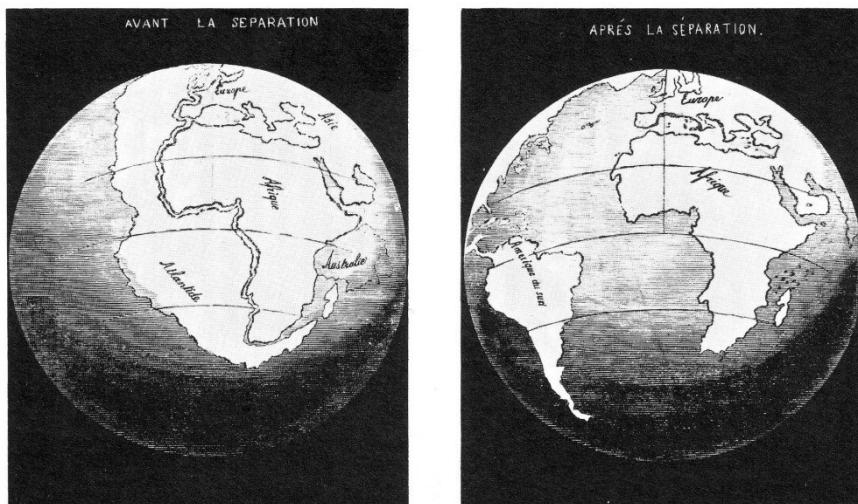
Kaip ir dauguma kitų mokslų, XVII–XVIII a. geologija buvo dvasininkų ir teologų rankose. Paplito nauji geologinių reiškinių atsiradimo aiškinamai, jog visas šių reiškinių atsiradimo priežastis paaiškina Biblija

Prancūzas Francas Placetas (1868) Amerikos atsiskirimą nuo Europos ir Afrikos susiejo su Biblijoje aprašomu potvyniu. Biblijoje skelbiama, kad iki potvynio Žemė buvo vientisa. Jis iškėlė prielaidą, kad po potvynio Pietų Amerika susiformavo iš plaukiojančių salų, atskirtų nuo Europos ir Afrikos.

Dar vienas mokslininkas, kuris siejo žemynų susiskaldymo priežastis su Didžiuoju potvyniu, buvo prancūzų geografas Antonis Snideris-Pelegrinis (1802–1885). 1858 m. žemėlapyje pademonstravo abiejų Amerikų, Afrikos ir Europos kontūrų sutapimą (1.1 pav.).

Vėliau jis savo žemynų susiskaldymo teoriją grindė ir tuo, jog abiejuose žemynuose (tiek Europos, tiek Šiaurės Amerikos) rastos augalų fosilijos buvo identiškos.

Ši iliustracija dažnai laikoma pirmąja žinoma iliustracija, kuri atspindi Afrikos bei Pietų Amerikos žemynų atitiktį.



1.1 pav. Antonio Sniderio-Pelegrinio 1858 m. iliustracija (Antonio ... 2012)

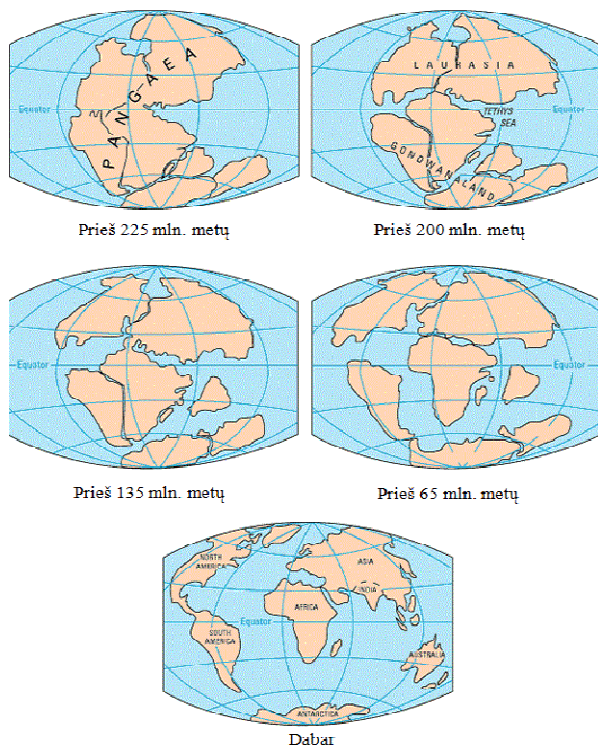
Fig. 1.1. Antonio Snider-Pellegrini's 1858 illustration (Antonio ... 2012)

Visą XIX a. iki XX a. pradžios visų geologų toliau buvo gvildinama idėja, jog kontinentai gali persikelti į kitą vietą Žemės paviršiuje.

XX a. pradžioje amerikietis geologas Frankas Busley Taylor (1860–1938) bandė aiškinti kalnų atsiradimo priežastis. Tačiau 1908 m. jo sukurta kontinentų dreifo teorija, buvo kitų mokslininkų ignoruojama ir greitai pamiršta.

Vėliau vokiečių mokslininkas Alfredas Lothar Vegeneris (1880–1930) bandydamas paaiškinti Afrikos vakarinės pakrantės ir Pietų Amerikos rytinės pakrantės kontūrų sutapimą, 1912 m. darbe „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“ paskelbė hipotezę, jog prieš daug milijonų metų visi žemynai buvo susijungę ir sudarė vieną didžiulį žemyną – Pangėją. Juros periode (prieš 180 mlj. metų) Pangėja skilo, o skilimo metu susidarė superkontinentai Gondvana ir Laurazija. Jog kontinentai juda vienas kito atžvilgiu, mokslininkas, kaip ir daugelis prieš jį buvusių mokslininkų, grindė kontinentų abipus Atlanto vandenyno kontūrų panašumu ir tarpusavio sutapimu. Teorijos pagrindimui, jis pateikė ir paaiškinimus, paremtus geologiniais ir paleontologiniais faktais. Jo atrasti identiški augalų ir gyvūnų rūšių arealai tiek Afrikos, tiek Pietų Amerikos žemynuose, papildė argumentų sąrašą hipotezės pagrindimui. Vienintelis Vegenerio teorijos trūkumas buvo tas, kad jis nesugebėjo atsakyti, kas sukelia tokius Žemės plutos judesius.

Vegenerio paskelbta kontinentų dreifo teorija pavaizduota 1.2 paveiksle (Kontinentų ... 2011).



1.2 pav. Kontinentų dreifas (Kontinentų ... 2011)

Fig. 1.2. Continental Drift (Kontinentų ... 2011)

Mokslininko Hario Hamondo Heso (1906–1969) idėja, jog Žemės pluta pasislinko į šonus nuo ilgų vulkaniškai aktyvių okeaninių kalnagūbrių, buvo laikoma viena iš svarbiausių XX a. atradimų geologijoje. Kartu su geologijos profesoriumi Robertu Sinkairu Dietzu (1914–1995), tyrinėdami vandenynų dugno profilius, pastebėjo, kad vandenynų dugnas plinta. Anot 1961 m. paskelbtos teorijos, mantijoje vyksta konvencijos (apie 1 cm per metus). Minėtų konvencijų kylantys srautai, kelia mantijos medžiagą ir taip sudaro pagrindą vandenyno dugno atsinaujinimui. Teorijoje sakoma, kad okeaninių baseinų struktūros yra nepastovios, o kontinentinės struktūros, atvirkščiai, yra stabilios. Mokslininkai teigė, kad patys kontinentai, būdami litosferos plokščių dalimi, slenka mantija. Taigi XX a. antroje pusėje buvo atgaivinta Vegenerio iškelta žemynų dreifo teorija.

Tokių mokslininkų tyrimų dėka atsirado naujas mokslas – plokščių tektonika. Pripažinus šį mokslą, dabar kitaip geodinamiškai traktuojami giluminiai lūžiai ir šiuolaikiniai tektoniniai judesiai (Suveizdis 2004).

1.2. Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimų apžvalga

Dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ilgą periodą vykstančių tektoninių Žemės plutos deformacijų tęsa (Zakarevičius 1994; Stanionis 2005). Šiais laikais didžiausias dėmesys dabartinių Žemės plutos judesių tyrimams skiriamas seisminiu požiūriu tokiuose aktyviausiose regionuose, kur Žemės pluta yra suskaldyta tektoninių lūžių ar plyšių, pvz. Vietname (Cong, Feigl 1999), Baikale (Petit *et al.* 1999; Luknev *et al.* 2010), Slovėnijoje (Vodopivec *et al.* 1993), Turkijoje (Provost *et al.* 2003; Kiradzi 2002), Taivane (Chang *et al.* 2003; Ching *et al.* 2007; Hsu, Li 2004; Yu *et al.* 1993), kalnuotose srityse, kaip pvz. Taivano kalnų grandinėje (Hsu *et al.* 2003), Etnos ugnikalnio regione (Puglisi *et al.* 2001), pietryčių Karpatuose (Hoeven *et al.* 2005), šiaurinėje Tian Šanio dalyje (Tyshkov *et al.* 2008), Filipinuose esančio Taal vulkano teritorijoje (Lowry *et al.* 2001).

Kaip jau minėta ankstesniame poskyryje, Žemės plutos judesiai vyksta ir vertikalia, ir horizontalia kryptimis, t. y. Žemės plutos judėjimas yra trimačio pobūdžio. Įprastai, daugumoje literatūros šaltinių, vertikalieji ir horizontalieji Žemės plutos judesiai nagrinėjami atskirai. Pagrindinis mokslininkų dėmesys tiriant dabartinius Žemės plutos judesius skiriamas judesių greičiams ir kryptių vektoriams nustatyti (Suveizdis 2004). Dabartiniais laikais, sparčiai tobulėjant geodezinių matavimų technologijoms, atsirado galimybė įvertinti ir erdvinius Žemės plutos judesius pagal kosminės geodezijos metodais sudarytų erdvinų geodezinių tinklų matavimų duomenis (Kuroki *et al.* 2002; Suito *et al.* 2002; Grafarend, Voosoghi 2003). Paprastai erdvinų Žemės plutos deformacijų rezultatų interpretavimas geotektoniniu požiūriu yra gana sudėtingas. Nėra įvertinamas Žemės formos sferoidiškumas.

Horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai geodeziniais metodais atliekami nuo dvidešimtojo amžiaus paskutiniojo dešimtmečio, atsiradus preciziniams geodeziniais prietaisams. Tokių prietaisų atsiradimas leidžia atlikti itin tikslūs matavimus, kurie lemia gerą geodezinių matavimų kokybę ir tikslumą. Atsižvelgiant į tai, kosminės geodezijos metodais sudarytų geodezinių tinklų matavimų duomenys, tapo vienu iš informacijos šaltinių nagrinėjant geodinaminiais procesais sukeltą Žemės plutos judėjimą (Wang, Ye 2005; Wang *et al.* 2008; El-Fiky 2000; El-Fiky, Kato 1999, El-Fiky *et al.* 1999; Hori 2003; Hori *et al.* 2008; Gordeev *et al.* 2001; Khazaradze *et al.* 1999; Dixon *et al.* 2000; Dragert 1999; Dragert *et al.* 1995; Grenerczy 2000).

Elementariausias būdas nustatyti Žemės plutos judesius yra identiškų punktų koordinačių, nustatytų skirtingais laikotarpiais, palyginimas. Tačiau gautieji rezultatai bus nevienareikšmiai, priklausantys nuo pasirinktų pradinių punktų bei jų kryptių (Dermanis 1981; Zakarevičius 1996a; Stanionis 2005). Daugelyje atvejų, sudarinėjant geodezinius tinklus taikomi skirtingi matavimų

apdorojimo metodai, todėl atsiranda sunkumų nustatant sąsajas tarp koordinacių sistemų bei geodezinių tinklų koordinacių sistemų orientavimo. Sudarinėjant geodezinius tinklus, neišvengiamos sistemingosios paklaidos. Tyrimais nustatyta, kad bet kokios, tiesiškai nuo punktų padėties priklausančios, sistemingosios koordinacių paklaidos turi įtakos deformacijų tenzorius elementų ir deformacijų rodiklių įvertinimams, tačiau deformacijų pokyčiai nagrinėjamoje teritorijoje išlieka tokie patys kaip ir be sistemingųjų paklaidų (Zakarevičius, Puzienė, Stanionis 2005; Stanionis 2005). Pačių Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimo klausimai moksliniuose šaltiniuose nepakankamai išnagrinėti.

Atsižvelgiant į tai, Žemės plutos judesių tyrimams pagal geodezinių tinklų matavimų duomenis plačiai taikomi invariantiški koordinacių sistemoms nustatymo metodai (Dermanis 1981; Zakarevičius 2003). Nepriklausomas nuo koordinacių sistemos parinkimo, geometrinės ar fizinės objektų savybės galima išskirti aprašant jas tenzoriumi, kuris pasižymi invariantiškumo savybėmis, todėl pastaruoju metu itin išpopuliarėjo Žemės plutos judesių tyrimo metodai pagal geodezinių matavimų duomenis pritaikant mechanikos mokslo srityse naudojamus (Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Kačianauskas 1997), tenzorinės analizės principais pagrįstus, metodus (Cai 2004; Pietrantonio, Riguzzi, 2004; Dermanis 1981, 2009, 2011; Zakarevičius 2000a, 2003; Stanionis 2005; Hackl *et al.* 2009; Allmendinger *et al.* 2007).

Pagal geodezinių matavimų duomenis deformacijų tenzorius komponentų bei deformacijų charakteristikų įvertinimo metodologiniai principai nagrinėti daugelyje literatūros šaltinių (Cai 2004; Cai, Grafarend 2007; Cai *et al.* 2005; Tsenkov, Gospodin 2002; Dermanis 1989, 2009, 2011; Vaníček 1972; Vaníček, Krakiwsky 1986; Vaníček *et al.* 2007). Žemės plutos deformacijoms apibūdinti pakanka antrojo rango tenzorius (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Schneider 1982). Deformacijų charakteristikos bei įtempių pokyčiai nustatomi taikant baigtinių elementų metodą (Abolghasem, Grafarend 2003; Arciniega, Reddy 2007; Baga *et al.* 1998; Kiamehr, Sjöberg 2005; Zhao *et al.* 2004a; Ponray *et al.* 2010; Hori *et al.* 2008; Kaiser *et al.* 2005; Hughes 2000; Rao 1999; Lesne *et al.* 1998). Nagrinėjant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas įprastai toks baigtinis elementas būna trikampis, o tiriant erdvinės Žemės plutos deformacijas – tetraedras. Pats elementariausias baigtinis elementas yra geodezinius punktus jungianti styga.

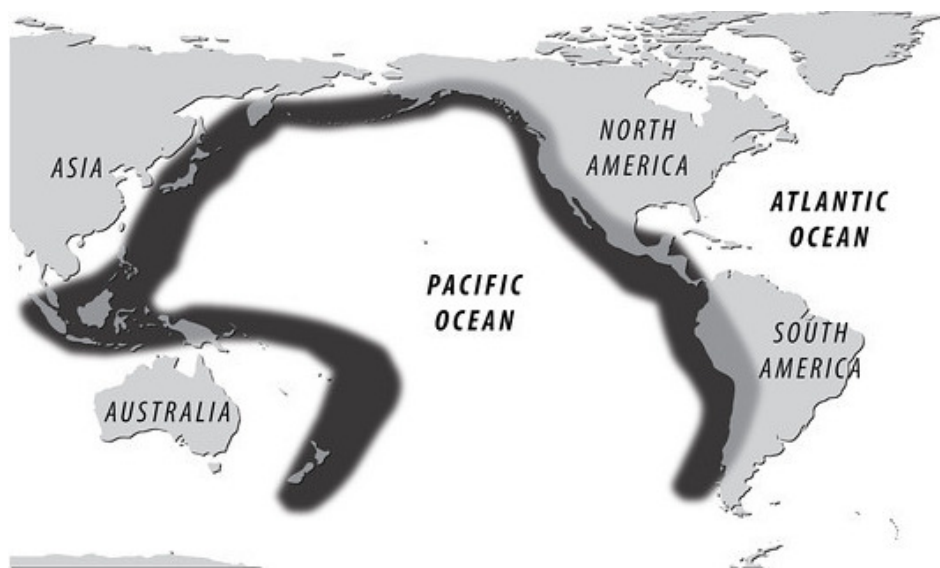
Žemės plutos deformacijų tyrimų rezultatai svarbūs sprendžiant klausimus apie šiuolaikinio geodinaminio įtempio lauko tendencijas. Geodeziniais metodais nustatyti Žemės pluta veikiančius geodinaminiai įtempiai taip pat galėtų būti vienas iš duomenų šaltinių prognozuojant geodinaminį procesus bei

atliekant teritorijų geodinaminį monitoringą. Geodinaminio įtempio lauko tyrimai geodeziniais metodais nagrinėti daugelio autorių (Lund, Townend 2007; Nazarova *et al.* 2002; Kaiser *et al.* 2005; Zhao *et al.* 2004a, 2004b; Hidekuni *et al.* 2003; Hori 2003; Hori *et al.* 2000, 2001, 2008; Kuroki *et al.* 2003; Zakarevičius *et al.* 2011; Aksamitauskas *et al.* 2006; Šliaupa *et al.* 2006).

Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimams vis daugiau taikomos baigtinių elementų metodo pagrindu sudarytos universaliosios ir specialiosios kompiuterinės programos, pvz. ANSYS, ABAQUS (Dyksterhuis *et al.* 2005; Nakasone *et al.* 2006) bei konkreitiems geodinaminiams uždaviniams spręsti sukurtos programos (Bird 1999; Teza *et al.* 2008). Žemės plutos judesių ir įtempių tyrimus, taikant ANSYS programinę įrangą, Lietuvoje atliktas (Stanionis 2005) darbe.

Nuo 1986 m. pasauliniu mastu pradėtas Pasaulinio tektoninių įtempių lauko žemėlapis sudarymo projektas (Heidbach *et al.* 2008; Olaiz *et al.* 2009), kurio viena iš pagrindinių veiklos sričių yra ir seismo pavojaus įvertinimas.

Ilgalaikių stebėjimų duomenimis nustatyta, jog seismingiausia ir pati pavojingiausia yra Ramiojo vandenyno plokštė, kuri iš pusių apsupta vulkaninių kalnų. Nustatyta, kad šiame, kitaip dar vadinamo Ugnies žiedo (1.3 pav.), regione įvyksta apie 90 % visų Pasaulio žemės drebėjimų bei ugnikalnių išsiveržimų.



1.3 pav. Ugnies žiedas (Ring of fire 2012)
Fig. 1.3. The ring of fire (Ring of fire 2012)

Seisminius įvykius teritorijoje nulemia seismotektoninis potencialas, t. y. stipriausias tikėtinas Žemės drebėjimas ir priklausomumas tarp Žemės drebėjimo stiprumo ir dažnumo. Žemės plutos deformacijos ir seismotektoninis potencialas yra tarpusavyje susiję reiškiniai, kuriuos sukelia dažnai tie patys giluminiai procesai Žemės gelmėse. Pasireiškiantys seisminiai įvykiai Žemės plutos srityse pasiskirsto nevienodai. Tikslios vietos bei laiko, kur ir kada įvyks tokie, giluminiais procesais sukelti geologiniai reiškiniai, nustatyti praktiškai neįmanoma, todėl seisminiams įvykiams prognozuoti, nuolat vykdomi teritorijų seisminiai stebėjimai, sudaromi teritorijų seisminio pavojaus žemėlapiai.

Ramiojo vandenyno plokštės pakraštyje labiausiai žinomas ir tyrinėjamas yra, Kalifornijos valstijoje esantis, San Andreaso tektoninis lūžis (Chery 2008; Parsons 2006; Ryan *et al.* 2008; Townend, Zoback 2004; Williams *et al.* 2006).

Dideliu seisminiu aktyvumu pasižymi Kinijos žemyninė dalis bei Japonijos salos. Šiuose regionuose atliekama itin daug Žemės plutos judesių tyrimų pagal kosminės geodezijos metodais sudarytų GPS tinklų matavimų duomenis (Zhao *et al.* 2004; Zhu, Shi 2011; Henry *et al.* 2001; Tsuji *et al.* 1995; Yang *et al.* 2005; Ye, Wang 2004; Sagiya *et al.* 2000; Suito *et al.* 2002; Hori *et al.* 2001; Kuroki, Yoshida 2002, 2003; Takahashi 2011).

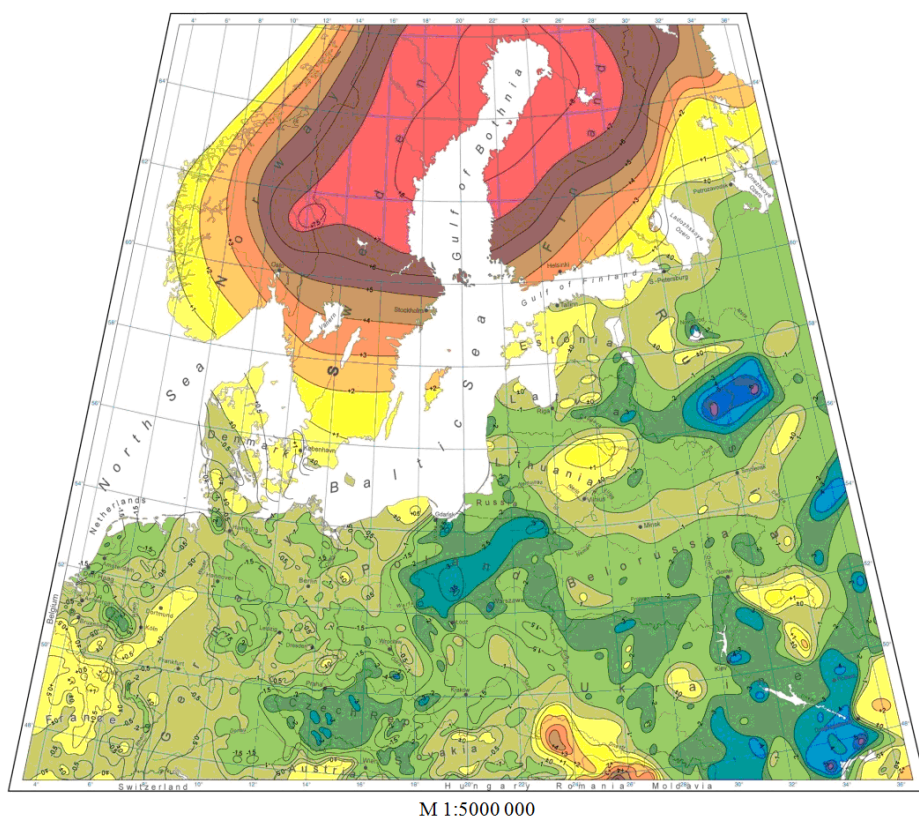
Eurazijos plokštėje taip pat išskiriamos tokios pavojingiausios Žemės drebėjimų sritys, kaip Viduržemio jūros, Juodosios jūros bei Artimųjų rytų regionai. Svarbiausia seisminio aktyvumo dalis koncentruojasi išilgai tarp Eurazijos ir Afrikos plokščių ribų, kur Afrikos plokštė yra panirusi po Eurazijos plokštę. Didelė dalis Žemės plutos judesių tyrimų šiame regione atliekami Italijos (Altiner 2001; Amato, Montone 1997; Barba *et al.* 2010; Calais *et al.* 2010; Caporali *et al.* 2003; Serpelloni *et al.* 2001, 2005), Graikijos (Clarke *et al.* 1997; Rontogianni 2010; Kahle *et al.* 1995, 1998; Mahmoud 2003; Mantovani *et al.* 2000; Papadimitriou, Sykes 2001), Egipto (El-Fiky 2005) teritorijose bei šalyse, kur išsidėsčiusi Alpių kalnų sistema (Jouanne *et al.* 1998, 2001; Sue *et al.* 2000; Viganò 2011; Vigny *et al.* 2002).

Turkijos vakarinėje dalyje atlikti tyrimų rezultatai parodė, jog nustatyti Žemės plutos judesių greičiai yra susiję su teritorijos seismiškai aktyviais regionais, žemės drebėjimų židiniiais bei kartografuotomis tektoninių lūžių vietomis. Nustatyta, jog pietinėje regiono dalyje yra žymiai mažesnis judesių greičiai nei šiaurinėje. Maksimalūs greičio skirtumai siekia iki 10 mm/per metus (Erdoğan *et al.* 2009).

Tokie Viduržemio jūros regione, vykstantys geodinaminiai procesai, įtakoja ir centrinės bei vakarų Europos tektoninį aktyvumą (Tesauro *et al.* 2006). Nagrinėjant horizontaliuosius Žemės plutos judesius pagal kosminės geodezijos metodais gautus matavimų rezultatus, daugelyje Europos dalių pastebimas mažas judrumas horizontalia kryptimi.

Remiantis 1994–2005 metais *CERGOP* (angl. *The Central European Geodynamics Project*) projekto metu atlikta 60 *GPS* tinklų stočių analize Centrinėje Europos dalyje, nustatytas horizontalaus judėjimo greitis *ITRF* (angl. *The International Terrestrial Reference Frame*) sistemoje neviršija 1–2 mm/per metus. Išsiskiria tik Adrijos regionas, kur horizontaliųjų judesių greičiai siekia 4–5 mm/per metus (Caparoli *et al.* 2008).

ICGP (angl. *International Geological Correlation Programme Neogeodynamica Baltica*) projekto metu (Aizberg *et al.* 2001) buvo sudarytas, didelę Europos teritoriją apimantis, dabartinių vertikalųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (1.4 pav.), kuriame matyti Žemės plutos kilimas Botnijos įlankoje.



1.4 pav. Dabartinių vertikalųjų judesių žemėlapis (Frischbutter, Schwab 2001)

Fig. 1.4. The map of the recent vertical movements (Frischbutter, Schwab 2001)

1.3. Žemės plutos judesių tyrimų Baltijos regione apžvalga

Pirmosios žinios, jog Žemės pluta šiaurės vakarinėje Europos dalyje juda, atsirado XVIII a., užfiksavus pirmųjų vandens lygio stebėjimų duomenis. Atlikti tyrimai leido daryti išvadą, jog Fenoskandijoje vyksta Žemės plutos kilimas (Anikėnienė 2008). Manoma, kad tokie Žemės plutos judesiai, pasireiškiantys vandens išsekimu bei kranto linijų pasitraukimu, susiję su poledynmetiniu teritorijos izostatiniu kilimu (Eknam 1991).

Vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai geodeziniais metodais Baltijos regione pradėti nuo XX a. penktojo dešimtmečio (Randjar 1993; Гуделис 1973). Taikant kartotinių niveliacijos matavimų duomenis, 1958 m. sudarytas pirmasis vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis, apimantis didelę Europinės SSRS dalį, į kurią patenka ne tik Baltijos regionas, bet ir Lietuvos teritorija (Современные ... 1958).

Pabaltijo regiono tektoninis vystymasis detaliam išnagrinėtas (Григалис 1979) darbe. Tiriant dabartinius vertikaliuosius judesius geodeziniais metodais itin pasižymėjo ir I. Liesis, kuris buvo pirmasis Lietuvos mokslininkų sudaręs vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapi pagal kartotinių niveliacijų duomenis (Liesis 1962).

Remiantis daugiamečiais geodezinių, gravimetrinių matavimų ir jūros lygio stebėjimų duomenimis, praeito amžiaus pabaigoje taip pat nustatytas vienos iš seniausių geologinių struktūrų, Baltijos skydo, kilimas (Афанасьев 1999).

Pagal kartotinius geodezinių matavimų rezultatus nustatytas maksimalus pakilimas (apie 8 mm/per metus) yra šiaurinėje Bosnijos įlankos dalyje, o artėjant rytų link prie Baltijos skydo ribų, pakilimas mažėja (Kakkuri, Poutanen 1997). Sąlyginė riba tarp pakilimo ir nusileidimo yra Leningrado srityje ir Karelijoje, o Ladogos ežero teritorijoje išsiskiria tam tikros anomalijos.

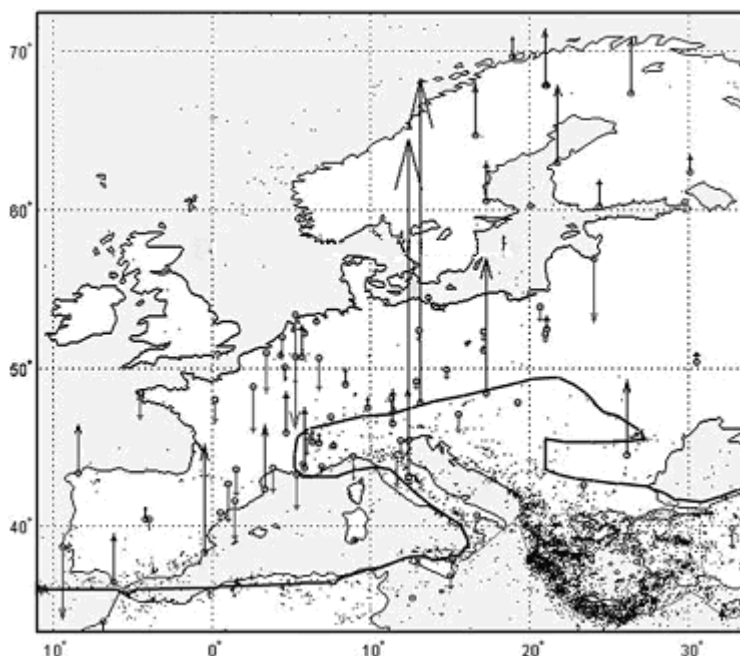
Seisminių tyrimų duomenys taip pat rodo žymius Žemės plutos judesius, įvykusius per pastaruosius 10 metų Baltijos jūros regione. Kaliningrade 2004 m. įvykęs Žemės drebėjimas buvo intensyviausias per pastaruosius 300 metų (Wiejacz 2004).

Manoma, kad šiaurės vakarinėje Europos dalyje esantis Baltijos regionas yra veikiamas ne tik Viduržemio jūros įtampų provincijos, bet ir regiono vakaruose esančios Šiaurės Atlanto įtampų provincijos. Prognozuojama, kad vakaruose Baltijos regiono teritorija veikiamą ŠV–PR kompresijos (Wu *et al.* 1999), o rytuose Š–P spaudimo (Šliaupa *et al.* 2004).

Pabaltijo regione prognozuojamas skirtingas teritorijos grimzdimas. Pagal GPS matavimų duomenis ir Žemės drebėjimų, kurių $M \geq 4$, epicentrų taškus, nustatyti Žemės plutos judesių vektoriai centrinėje ir vakarinėje Europos dalyje

(1.5 pav.) taip pat rodo Pirėnų pusiasalio, Skandinavijos ir Alpių regionų Žemės plutos kilimo procesą maždaug 0,7–3,5 mm/per metus (Гатинский *et al.* 2008).

Tuo tarpu didesnėje Prancūzijos dalyje, šiaurinėse Vokietijos ir Italijos dalyse, centriniam Viduržemio jūros regione, šiaurės vakarinėje Rumunijos dalyje bei Pabaltijo šalių teritorijose vyksta Žemės plutos grimzdimas (0,5–1,5 mm/per metus).



1.5 pav. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių vektoriai (Гатинский *et al.* 2008)

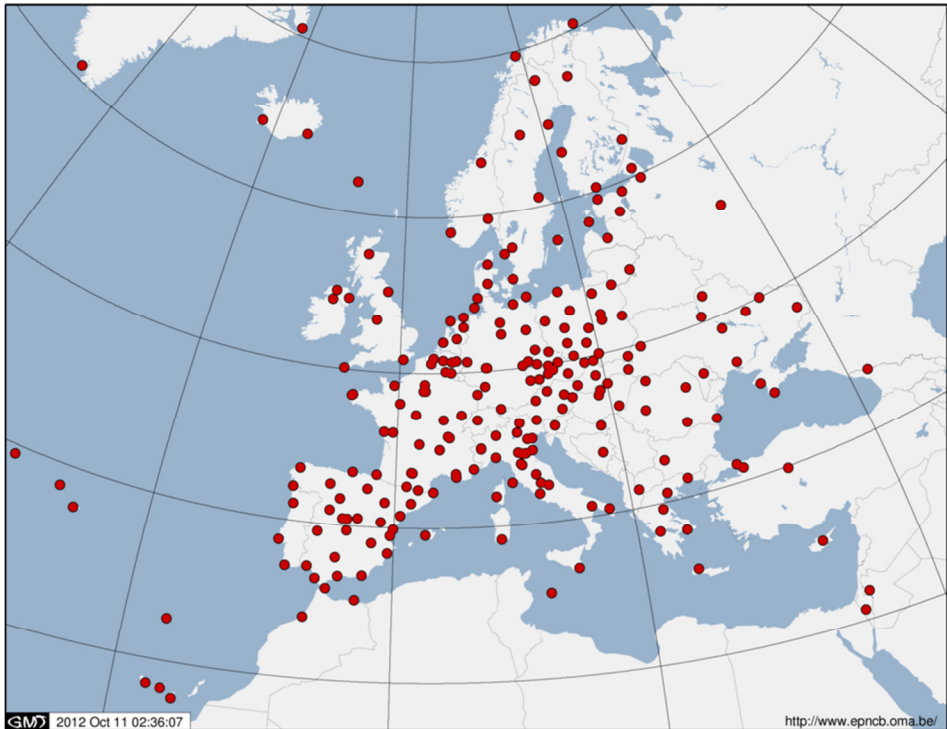
Fig. 1.5. Vectors of Earth's crust vertical movements (Гатинский *et al.* 2008)

Manoma, kad rytinės Baltijos ir kaimyninių šalių neotektoninis Žemės plutos kilimas buvo didesnis kaip 75 m, o grimzdimas – per 250 m (Šliaupa, A. *et al.* 1996). Pagal geodezinių matavimų metodus išnagrinėtus horizontaliuosius Žemės plutos judesius Baltijos regione, nustatyta, kad teritorija veikiama netolygių tektoninių įtampių besitęsiančių toliau į Skandinaviją, taip pat grimzta (Zakarevičius *et al.* 2008).

Žemės plutos deformacijų tyrimams, jūros lygio stebėjimams bei tektonikos tyrimams Fenoskandijoje 1993 m. inicijuotas *BIFROST* (angl. *Baseline Inferences for Fennoscandia Rebound, Sea Level and Tectonics*) projektas. Detalieji apie projekto metu atliekamus tyrimus aprašyta (Scherneck *et al.* 1998a, 2001b, 2010c, Lidberg *et al.* 2010) moksliniuose darbuose.

Nagrinėjant Žemės plutos judesius geodeziniais metodais plačiausiai taikomi kosminės geodezijos matavimų duomenys (Cerveira *et al.* 2006; Grenerzy 2000; Pan *et al.* 2001; Nocquet, Calais 2003, 2004; Wang *et al.* 2008; Wang, Ye 2005; Henry *et al.* 2001; Zanutta *et al.* 2008). Geodezinių tinklų infrastruktūra visame Pasaulyje yra itin išplėtotą. Žemės plutos judesių tyrimams ne tik Baltijos regione, bet ir visoje Europoje yra tinkamas pakankamai tankus nuolat veikiančių referencinių GPS stočių tinklas (angl. *EUREF Permanent Network – EPN*).

Šis GPS tinklas susideda iš maždaug iš 250 pastoviai veikiančių stočių, kurių koordinatės nustatomos ETRS 89 koordinacių sistemoje (1.6 pav.). *EUREF GPS* tinklas tenkina ir geodinaminių tyrimų reikalavimus, kadangi nuolatiniai matavimai daugelyje stočių atliekami nuo 1996 m. (Kenyeres, Bruyninx 2004; Panafidina *et al.* 2006).



1.6 pav. EUREF tinklas (EUREF 2012)

Fig. 1.6. EUREF Permanent Network (EUREF 2012)

Pagrindinė informacija apie punktus ir tų punktų matavimų duomenis pateikiami EPN tinklalapyje <http://www.epncb.oma.be> (EUREF ... 2011): dienos, valandos arba 15 minučių EPN stočių stebėjimų duomenys skelbiami RINEX formatu, savaitiniai EPN stočių matavimų duomenys – SINEX formatu. Analizuojant tinklalapyje skelbiamą informaciją, nustatyta, kad daugumos šiaurės vakarinėje Europos dalyje esančių nuolat veikiančių *GPS* stočių stebėjimai pradėti nuo 2004 m. (A priedas), todėl tolimesniems tyrimams buvo panaudoti *GPS* stočių matavimų duomenys nuo 2004 m. iki 2012 m. *GPS* stočių pasirinkimą lėmė ir jų išsidėstymas nagrinėjamoje Baltijos regiono teritorijoje.

Detalus dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai Lietuvos teritorijoje atlikti A. Zakarevičiaus, A. Anikienės ir R. Puzienės darbuose (Zakarevičius 1994, 2000d, 2002, 2003; Anikienė 2008; Puzienė 2009).

Horizontalieji Žemės plutos judesiai Lietuvoje nagrinėti panaudojant iki 1940 m. sudaryto trianguliacijos tinklo bei, taikant kosminės geodezijos metodus, 1992–1994 metais sudarytų nulinės bei pirmosios klasės *GPS* tinklų matavimų duomenys. Minėtų geodezinių tinklų sudarymo ir gautųjų matavimų rezultatų apdorojimo klausimai aptarti (Kazakevičius *et al.* 1997; Petroškevičius *et al.* 1997; Petroškevičius, Ramanauskas 1995; Skeivalas 2008; Skeivalas *et al.* 1995; Zakarevičius 1996a, 1996c, 2000b) darbuose.

Gautųjų tyrimų rezultatai apibendrinti mokslininkų A. Zakarevičiaus ir A. Stanionio ir kitų bendraautorių darbuose (Zakarevičius 1998a, 1998b, 2000, 2000c, 2003; Zakarevičius, Stanionis 2002, 2005a; Zakarevičius *et al.* 2010; Stanionis 2005). Nustatytų horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų duomenys palyginti su kitų mokslininkų atliktais tyrimais Lietuvos teritorijoje (Pačėsa 2005; Skridlaitė, Motuza 2001; Šliaupa, A. 1998; Šliaupa 1998, 1999; Šliaupa, Bitinas, Zakarevičius 2005; Šliaupa *et al.* 2004).

Įvertinant Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų charakteristikas pagal nevienodo tikslumo geodezinių matavimų duomenis, buvo nustatytos tik bendrosios Žemės plutos judesių tendencijos Lietuvos teritorijoje (Stanionis 2005; Zakarevičius 2003).

Pastebėta, kad horizontaliųjų Žemės plutos judesių sklaida teritorijoje pasižymi sistemingais dėsningumais. Todėl, siekiant patikimai įvertinti nustatytų Žemės plutos deformacijų skaitmeninių rodiklių reikšmes bei palyginti gautus rezultatus ne tik su regioninėmis tektoninio fono savybėmis bei struktūromis, bet ir potencialiomis seismogeninėmis zonomis, tikslinga atlikti tyrimus panaudojant pakartotinių *GPS* matavimų duomenis.

Minėtų tyrimų Lietuvoje gautieji rezultatai būtų itin aktualūs ne tik dėl esamos Ignalinos atominės elektrinės ar esamų padidinto ekologinio pavojaus statinių (Ignalinos atominė elektrinė, Mažeikiuose esanti naftos perdėbimo įmonė, Jonavoje ir Kėdainiuose esančios chemijos gamyklos ir pan.), kurių eksploatavimas, seisminių įvykių metu, gali būti sutrikdytas ir net

pavojingas aplinkai, bet ir itin svarbūs dėl naujos Visagino atominės elektrinės statybos vietos parinkimo.

Žemės plutos geodinaminių įtempių tyrimai Lietuvoje atliekami nuo 2004 m. Taikant teoriškai pagrįstą (Stanionis 2005) įtempiams skaičiuoti tenzorinės analizės metodiką, apskaičiuoti pirmieji Žemės plutos geodinaminių normalinių ir tangentinių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone (Zakarevičius, Stanionis 2004b; Stanionis 2005). Pagal erdvinio GPS tinklo duomenis buvo nustatyti Žemės plutos erdviniai geodinaminiai normaliniai bei tangentiniai įtempiai (Zakarevičius, Stanionis 2007).

Nors Lietuvos teritorija traktuojama kaip aseisminė arba mažo seismingumo sritis, tačiau turimi istoriniai ir dabartiniai duomenys rodo, kad Lietuvos kraštuose yra buvę juntamų Žemės drebėjimų (Nauja atominė ... 2008). Vieni iš pažymėtinų yra įvykę Latvijoje: 1616 m. Bauskėje bei 1908 m. Daugpilyje (Lazauskienė, Janutytė 2011). Seisminiu rajonavimu Lietuvoje rimčiau susidomėta po, 1976 m. Estijoje įvykusio, Osmusamės Žemės drebėjimo (Anikėnienė 2008; Puzienė 2009; Stanionis 2005).

Pirmieji seismologiniai instrumentiniai stebėjimai Lietuvoje pradėti 1970 m. (Pačėsa *et al.* 2005). Pagrindiniai duomenys apie seisminį aktyvumą Lietuvos teritorijoje remiasi Skandinavijos seisminių stočių registracijos duomenimis (Šliaupa *et al.* 2004).

Vadovaujantis turimais geologiniais ir geofiziniais duomenimis, 1995–2000 metais atliktas Lietuvos teritorijos seisminis rajonavimas apžvalginiu masteliu, nustatytos seismogeninės zonos, nurodytas jų maksimalus seisminis potencialas (Lietuvos Respublikos ... 2006).

Detaliai seismotektoninis aktyvumas Lietuvoje išnagrinėtas V. Ilginytės darbuose (Ilginytė 1998a, 1998b). Seisminiais įvykiais Baltijos regione domėjosi ir kiti mokslininkai (Pačėsa, Šliaupa ir Satkūnas 2005). 2003 metais V. Ilginytė, A. Šliaupa ir I. Bagdanavičiūtė sudarė seismotektoninio rajonavimo žemėlapi, kuriame pavaizduoti kai kurie Lietuvos teritorijos rajonai yra padidinto seisminio aktyvumo.

Yra išskiriama keletas seismogeninių zonų: Vilniaus–Šiaulių, Rytų Pabaltijo, Pajūrio, Šiaurės Telšių, Salantų, Mažeikių, Vidurio Lietuvos, Vakarų Pabaltijo, Panevėžio–Dūkštų, Jurbarko.

Iki 5 balų, seisminio aktyvumo srityse yra centrinė bei pietinė Lietuva. Didesnio, 5-6 balų, seismingumo sričiai priklauso jūros pakrantės zona, Šiaurės Telšių lūžių zonos plotas, esantis tarp Šilalės ir Tauragės lūžių bei dalis regioninio Vilniaus–Mažeikių lūžio (Ilginytė 1998a, 1998b).

Rytinė Lietuvos dalis (Ignalinos rajonas) yra padidėjusio aktyvumo Daugpilio seismogeninė zona. Joje galimas net 7 balų Žemės drebėjimas.

Todėl šioje Lietuvos teritorijos dalyje Žemės plutos judesių tyrimai itin aktualūs.

Pažymėtina, jog 1998 m. buvusių SSSR valstybių sudaryta komisija, vertinant Ignalinos atominės elektrinės teritorijos seismingumą, konstatavo, kad išsamūs, geodeziniais metodais pagrįsti tyrimai dabartinių tektoninių lūžių aktyvumo įvertinimui nebuvo atlikti.

Atkreiptinas dėmesys, kad šio rajono geologinės ir tektoninės sąlygos yra sudėtingos. Elektrinė pastatyta stambių Rytų Europos platformos regioninių struktūrų Latvijos balno ir Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės sandūroje.

Todėl, siekiant nustatyti, ar šioje teritorijoje yra aktyvių giluminių tektoninių lūžių ir, ar šių tektoninių lūžių galimai sukelti Žemės plutos judesiai nesudarys pavojaus aplinkai eksploatuojant objektą, 1989 m. buvo įrengtas geodinaminio monitoringo poligonas. Ignalinos atominės elektrinės regiono geodinaminį poligoną sudaro precizinės niveliacijos tinklas (viso 114 punktų). Matavimai šiame poligone atlikti 1989 m., 1990 m., 1991 m., 1992 m. ir 1994 m.

Naudojantis kartotiniaisiais niveliacijos tinklo duomenimis, buvo atlikti išsamūs vertikaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės regione tyrimai. Atlikti tyrimai ir gautieji rezultatai aprobuoti autorių (Česnauskienė 2002; Česnauskienė, Aleknienė 2001; Kazakevičius, Steponavienė 1994; Marcinkevičius, Laškovas 1996; Šliaupa 1999; Zakarevičius 1994, 1994b, 1995, 1997, 1999a, 1999b, 2003; Zakarevičius, Česnauskienė 1995; Zakarevičius, Stanionis 2003a, 2003c, 2004b; Zakarevičius *et al.* 1994) darbuose.

Remiantis kartotinių matavimų metu gautais ir išlygintais aukščių skirtumų tarp reperijų pokyčiais, nustatyta, kad vertikalieji Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone yra diferencijuoti pagal svarbiausius kristalinio pamato lūžius, ribojančius žemesnės eilės tektonines struktūras (Zakarevičius 2003). Darytina išvada, kad poligone nustatyti vertikalieji Žemės plutos judesiai atspindi dabartinį tektoninį aktyvumą, t. y. kai kurie kristalinio pamato lūžiai yra aktyvūs. Geologinių tyrimų duomenimis nustatyta, kad kristalinio pamato blokai minėtame regione gali judėti ne tik vertikalia, bet ir horizontalia kryptimi.

Žemės plutos horizontaliųjų judesių stebėjimams, Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone 1998 m. įrengtas GPS tinklas. Apdorojus matavimų duomenis, nustatyta, kad vidutinės kvadratinės poligono stygų matavimo paklaidos yra 0,3–2,4 mm. Punktų koordinačių vidutinės kvadratinės paklaidos yra ne didesnės kaip 1,2 mm. GPS punktai išdėstyti taip, kad būtų galima kontroliuoti platuminės krypties neotektoninę zoną, einančią prie pat elektrinės, Apvardų meridianinių lūžių zoną, meridianinės krypties neotektoninę zoną, kur požeminiame vandenyje nustatyta padidėjusi helio

dujų koncentracija, Dūkštų įlinkio santykinius judėjimus vienas kito atžvilgiu (Stanionis 2005).

Horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone tyrimų rezultatai paskelbti (Aksamitauskas *et al.* 2006; Baušys *et al.* 2008; Stanionis 2005; Zakarevičius *et al.* 2005; Zakarevičius, Puzienė ir Stanionis 2005; Zakarevičius, Stanionis 2003c, 2004a, 2004b, 2005b) moksliniuose darbuose. Erdviniai Žemės plutos judesiai nagrinėti A. Zakarevičiaus ir A. Stanionio (Zakarevičius, Stanionis 2006, 2007; Stanionis 2008). Iš atliktų tyrimų nustatyta, kad teritorijoje vyksta gana intensyvūs geodinaminiai procesai (Aksamitauskas *et al.* 2006; Baušys *et al.* 2008; Stanionis 2005; Zakarevičius *et al.* 2005, 2007; Zakarevičius, Stanionis 2003c, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b). Nustatyta, kad Ignalinos atominės elektrinės teritorija yra tektoninio spaudimo zonoje.

Modeliuojant baigtinių elementų, nustatyti tam tikri Žemės plutos horizontaliųjų judesių dėsningumai. Nustatyta, kad didžiausias santykinis pailgėjimas didėja iš pietvakarių į šiaurės rytus, o izolinių kryptys ir jų pokyčiai koreliuoja su tektoninių lūžių kryptimis. Pietvakarinėje dalyje didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi yra tektoninio spaudimo zona. Pietrytine kryptimi ši zona mažėja, o šiaurės rytinėje dalyje – pereina į tempimo zoną (Stanionis 2005). Pereinant nuo Dūkštų grabeno prie šiaurės Zarasų pakopos, pastebimos anomalijos mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi. Deformacijos mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimis yra neigiamos ir apie 10 kartų intensyvesnės nei didžiausio santykinio pailgėjimo kryptimi. Tyrimo metu gauti neigiami santykinio dilatacijų rodikliai rodo, kad Ignalinos atominės elektrinės teritorija yra tektoninio spaudimo zonoje. Nustatyti, maksimalių geodinaminių įtempių pokyčiai yra beveik lygiagretūs su kristalinio pamato lūžiais, o minimalių geodinaminių įtempių pokyčiai – statmeni minėtiems lūžiams (Zakarevičius 2000a; Zakarevičius, Stanionis 2003b, 2006, 2007).

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros analizę, galima daryti tokias išvadas:

1. Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimams dideliuose regionuose tikslinga taikyti kosminės geodezijos metodais gautus matavimo rezultatus.

2. Kosminės geodezijos metodų taikymo tiriant dabartinius Žemės plutos judesius tinkama išplėtotą Europos geodezinių tinklų infrastruktūra – nuolat veikiančių *GPS* stočių tinklas.
3. Baltijos regione pakankamai tankus nuolat veikiančių *GPS* stočių tinklas, tenkinantis geodinaminių tyrimų reikalavimus, sukurtas 2000–2004 metais. Daugelyje stočių nepertraukiami matavimai atliekami nuo 2004 m., todėl yra pakankamai duomenų nagrinėti dabartinius Žemės plutos judesius per aštuonerių metų laiko tarpą.
4. Tyrimams regione, apimančiame Baltijos jūros ir jos aplinkos teritoriją, pasirinkimas grindžiamas šiais pagrindiniais motyvais:
 - Regionas aktualus geotektoniniu požiūriu, kadangi Baltijos regiono zonoje yra sąlytis dviejų geotektoninių įtempių laukų – Viduržemio jūros ir Šiaurės Atlanto vandenyno.
 - Iš literatūros analizės matyti, kad pasirinktame tyrimams Baltijos regione iki šiol atlikti tyrimai yra mažesnio detalumo nei Fenoskandijos teritorijoje ar centrinėje bei pietinėje Europoje. Todėl šie tyrimai papildys Žemės plutos deformacijų rodiklius bendrame Europos regione.
 - Tyrimams atlikti yra sukurtas pastoviai veikiančių *GPS* stočių tinklas su apie 10 metų vykstančiais nepertraukiamais matavimais.
5. Tyrimų metodiką tikslinga pasirinkti paremtą geodezinių matavimų rezultatų tenzorinės analizės būdais.
6. Išanalizavus tenzorinės analizės taikymo Žemės plutos judesiams tirti pagal geodezinių matavimų rezultatus ypatumus, galima teigti, kad yra nepakankamai išspręstas Žemės formos sferoidiškumo įvertinimo metodikos bei deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimo klausimai.

Atsižvelgiant į literatūros analizės rezultatus, išryškintus probleminius klausimus bei darbo tikslą, disertaciniame darbe reikalinga išspręsti tokius pagrindinius uždavinius:

1. Parengti patobulintą metodiką dabartinių Žemės plutos judesių rodiklių nustatymui, įvertinant Žemės formos sferoidiškumą.
2. Taikant parengtą metodiką, įvertinti dabartinių Žemės plutos judesių charakteristikas.
3. Parengti apskaičiuotų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių tikslumo įvertinimo metodiką.

4. Taikant parengtą metodiką, atlikti nustatytų dabartinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių tikslumo bei patikimumo analizę.
5. Ištirti dabartinių Žemės plutos deformacijų dėsningumus ir sklaidos ypatumus.

Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo metodika

Skyriuje išnagrinėta erdvinių bei horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių bei įtempių įvertinimo metodika pagal geodezinių matavimų duomenis. Nustatytų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimui, siūloma taikyti kelių kintamųjų funkcijų tikslumo įvertinimo metodiką. Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimo, atsižvelgiant į Žemės formos sferoidiškumą metodikos patobulinimui, pateikiamos teoriškai pagrįstos rekomendacijos.

Skyriaus tematika atlikti tyrimai paskelbti autoriaus straipsniuose bei konferencijų medžiagoje (Levinskaitė 2009, 2012; Zakarevičius *et al.* 2009, 2010, 2012).

2.1. Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas taikant geodezinių matavimų duomenis

Žemės plutos deformacijas apibūdinantys geometriniai rodikliai įvairiose teritorijų dalyse dažniausiai yra nevienodi ir kinta netiesiškai. Norint supaprastinti šių rodiklių radimo uždavinio sprendimą, deformacijų tenzorius elementus galima įvertinti taikant baigtinių elementų metodą.

2.1.1. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas

Nagrinėjant erdvinės Žemės plutos deformacijas, kaip ir horizontalių Žemės plutos deformacijų atveju, pakanka antrojo rango tenzorius (Schneider 1982; Zakarevičius 2000a; Atkočiūnas, Nagevičius 2004), kuris apibūdina baigtinio elemento posūkį ir jo grynąsias deformacijas:

$$\|T\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{vmatrix}, \quad (2.1.1)$$

čia

$$u = \Delta x = u(x, y, z), \quad (2.1.2)$$

$$v = \Delta y = v(x, y, z), \quad (2.1.3)$$

$$w = \Delta z = w(x, y, z), \quad (2.1.4)$$

čia u, v, w – koordinačių pokyčiai, išreikšti tiesinėmis koordinačių funkcijomis, $e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{xy}, e_{xz}, e_{yx}, e_{yz}, e_{zx}, e_{zy}$ – antrojo rango deformacijų tenzorius elementai.

Antrojo rango erdvinių deformacijų tenzorius elementai apskaičiuojami analogiškai kaip ir plokščiųjų deformacijų (Schneider 1982; Zakarevičius 2000a):

$$e_{ij} = \frac{D_{ij}}{D}, \quad (2.1.5)$$

čia i ir j – antrojo rango deformacijų tenzorius elementų ir determinantų indeksai.

Determinantai (2.1.5) yra (Schneider 1982; Zakarevičius 2000a):

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.6)$$

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & \Delta x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.7)$$

$$D_{12} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & \Delta x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & \Delta x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & \Delta x_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.8)$$

$$D_{13} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \Delta x_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & \Delta x_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & \Delta x_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & \Delta x_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.9)$$

$$D_{21} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta y_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & \Delta y_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & \Delta y_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & \Delta y_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.10)$$

$$D_{22} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & \Delta y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & \Delta y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & \Delta y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.11)$$

$$D_{23} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \Delta y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & \Delta y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & \Delta y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & \Delta y_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.12)$$

$$D_{31} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta z_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & \Delta z_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & \Delta z_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & \Delta z_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.13)$$

$$D_{32} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta z_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & \Delta z_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & \Delta z_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & \Delta z_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.1.14)$$

$$D_{33} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \Delta z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & \Delta z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & \Delta z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & \Delta z_4 \end{vmatrix}. \quad (2.1.15)$$

Tenzorių (2.1.1) galima išskaidyti į dvi dalis (Pietrantonio, Riguzzi 2004; Zakarevičius 2000a);

$$\|T\| = \|A\| + \|W\|, \quad (2.1.16)$$

čia

$$\|A\| = \left\| \begin{vmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) & \frac{1}{2}(e_{xz} + e_{zx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{yy} & \frac{1}{2}(e_{yz} + e_{zy}) \\ \frac{1}{2}(e_{zx} + e_{xz}) & \frac{1}{2}(e_{zy} + e_{yz}) & e_{zz} \end{vmatrix} \right\|, \quad (2.1.17)$$

$$\|W\| = \left\| \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}(e_{xy} - e_{yx}) & \frac{1}{2}(e_{xz} - e_{zx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} - e_{xy}) & 0 & \frac{1}{2}(e_{yz} - e_{zy}) \\ \frac{1}{2}(e_{zx} - e_{xz}) & \frac{1}{2}(e_{zy} - e_{yz}) & 0 \end{vmatrix} \right\|, \quad (2.1.18)$$

čia e_{xx}, e_{yy}, e_{zz} – santykinės linijinės deformacijos, $e_{xy}, e_{xz}, e_{yx}, e_{yz}, e_{zx}, e_{zy}$ – santykinės šlyties deformacijos. Tenzoriaus (2.1.17) diagonaliniai elementai apibūdina santykinius baigtinio elemento pailgėjimus ašių kryptimis.

Svarbiausiosios deformacijos apskaičiuojamos iš kubinės lygties (Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Zakarevičius 2000a):

$$C^3 - D_1 C^2 + D_2 C - D_3 = 0, \quad (2.1.19)$$

čia C – tikrinės matricos reikšmės, D_1, D_2, D_3 – koeficientai, kurie randami:

$$D_1 = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}, \quad (2.1.20)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{xx} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xz} + e_{zx}) \\ \frac{1}{2}(e_{xz} + e_{zx}) & e_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} e_{yy} & \frac{1}{2}(e_{yz} + e_{zy}) \\ \frac{1}{2}(e_{yz} + e_{zy}) & e_{zz} \end{vmatrix}, \quad (2.1.21)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) & \frac{1}{2}(e_{xz} + e_{zx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{yy} & \frac{1}{2}(e_{yz} + e_{zy}) \\ \frac{1}{2}(e_{xz} + e_{zx}) & \frac{1}{2}(e_{yz} + e_{zy}) & e_{zz} \end{vmatrix}. \quad (2.1.22)$$

Išsprendus (2.1.19) lygtį, gauname tris šaknis, kurios yra grynujų deformacijų reikšmės trimis statmenomis ašių kryptimis.

Erdvinės Žemės plutos deformacijų charakteristikas, taikant laisvojo taškų poslinkio tolygiai besideformuojančioje trimatėje erdvėje modelį, galime įvertinti mažiausiųjų kvadratų metodu (Stanionis 2005; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\Delta E = H \cdot T, \quad (2.1.23)$$

čia ΔE – punktų erdvinių koordinačių poslinkių vektorius, H – punktų erdvinių koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica, T – erdvinių Žemės plutos deformacijų parametrų vektorius.

Punktų erdvinių koordinačių poslinkių vektorius yra (Stanionis 2005):

$$\Delta E = [\Delta X_1 \quad \Delta Y_1 \quad \Delta Z_1 \quad \dots \quad \Delta X_i \quad \Delta Y_i \quad \Delta Z_i \quad \dots \quad \Delta X_n \quad \Delta Y_n \quad \Delta Z_n]^T, \quad (2.1.24)$$

čia ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i – erdviųjų stačiakampių ekvatorinių geocentrinių geodezinio tinklo punktų koordinatų pokyčiai, kurie gaunami:

$$\Delta X_i = X'_i - X_i, \quad (2.1.25)$$

$$\Delta Y_i = Y'_i - Y_i, \quad (2.1.26)$$

$$\Delta Z_i = Z'_i - Z_i, \quad (2.1.27)$$

čia X_i , Y_i , Z_i – pirmojo matavimo erdviųjų stačiakampių geocentrinių geodezinio tinklo punktų koordinatės X'_i , Y'_i , Z'_i – antrojo matavimo erdviųjų stačiakampių geocentrinių geodezinio tinklo punktų koordinatės, $i = 1, 2, \dots, n$.

Punktų erdviųjų koordinatų nuokrypių nuo jų vidurkio matrica užrašoma (Stanionis 2005):

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -Y_{S_1} & X_{S_1} & 0 & 0 & Y_{S_1} & Z_{S_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_1} & 0 & Y_{S_1} & 0 & X_{S_1} & 0 & Z_{S_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_1} & 0 & X_{S_1} & Y_{S_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & -Y_{S_i} & X_{S_i} & 0 & 0 & Y_{S_i} & Z_{S_i} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_i} & 0 & Y_{S_i} & 0 & X_{S_i} & 0 & Z_{S_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_i} & 0 & X_{S_i} & Y_{S_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & -Y_{S_n} & X_{S_n} & 0 & 0 & Y_{S_n} & Z_{S_n} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_n} & 0 & Y_{S_n} & 0 & X_{S_n} & 0 & Y_{S_n} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_n} & 0 & X_{S_n} & Z_{S_n} \end{bmatrix}, \quad (2.1.28)$$

čia X_{S_i} , Y_{S_i} , Z_{S_i} – erdviųjų geodezinio tinklo punktų koordinatų nuokrypiai nuo jų vidurkio $i = 1, 2, \dots, n$.

Erdviųjų Žemės plutos deformacijų parametrų vektorius yra (Stanionis 2005; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$T = [\alpha_X \quad \alpha_Y \quad \alpha_Z \quad \omega \quad \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{xz} \quad \varepsilon_{yz}]^T, \quad (2.1.29)$$

čia $\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z$ – poslinkiai koordinačių ašių kryptimis, ω – baigtinio elemento posūkis, $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – santykinės linijinės deformacijos, $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ – santykinės šlyties deformacijos.

Erdvinių deformacijų vektorių įvertiname mažiausiųjų kvadratų metodu (Stanionis 2005; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$T = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot \Delta E. \quad (2.1.30)$$

Norint įvertinti erdvinės Žemės plutos deformacijas, minimali geometrinė figūra (baigtinis elementas) yra trikampio prizmė. Atsižvelgiant į tai, matrica (2.1.28) bus sudaryta iš keturių taškų, sudarančių prizmės viršūnes, koordinačių. Matricoje (2.1.28) bus dvylika eilučių bei vektorių (2.1.24) sudarys dvylika narių.

Kai pasirinktame baigtiniame elemente yra daugiau nei keturi taškai, minėtoje matricoje bus $3 \cdot n$ eilučių (čia n – taškų su žinomais koordinačių pokyčiais skaičius). Šiuo atveju vektorių (2.1.24) taip pat sudarys $3 \cdot n$ narių. Pagal (2.1.30) apskaičiuojami apibendrintieji deformacijų rodikliai, kurių įverčiai tenkina mažiausiųjų kvadratų metodo sąlygas.

2.1.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimas

Žemės plutos deformacijų tenzorius, nagrinėjant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas yra (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Schneider 1982):

$$\|T\| = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{Bmatrix}, \quad (2.1.31)$$

čia

$$u = \Delta x = u(x, y), \quad (2.1.32)$$

$$v = \Delta y = v(x, y), \quad (2.1.33)$$

čia u, v – koordinačių pokyčiai, išreikšti Dekarto koordinačių sistemoje tiesinėmis koordinačių funkcijomis, $e_{xx}, e_{xy}, e_{yx}, e_{yy}$ – antrojo rango deformacijų tenzorius elementai.

Antrojo rango deformacijų tenzorius elementai apskaičiuojami taip (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Schneider 1982):

$$e_{ij} = \frac{D_{ij}}{D}, \quad (2.1.34)$$

čia i ir j – antrojo rango deformacijų tenzorius elementų ir determinantų indeksai.

Determinantai, nurodyti (2.4) formulėje, yra (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Schneider 1982):

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (2.1.35)$$

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (2.1.36)$$

$$D_{12} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta x_1 \\ 1 & x_2 & \Delta x_2 \\ 1 & x_3 & \Delta x_3 \end{vmatrix}, \quad (2.1.37)$$

$$D_{21} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta y_1 & y_1 \\ 1 & \Delta y_2 & y_2 \\ 1 & \Delta y_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (2.1.38)$$

$$D_{22} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta y_1 \\ 1 & x_2 & \Delta y_2 \\ 1 & x_3 & \Delta y_3 \end{vmatrix}, \quad (2.1.39)$$

čia $\Delta x_i = x_i - x'_i$, $\Delta y_i = y_i - y'_i$, $i = 1, 2, 3$ – baigtinio elemento (trikampio) viršūnės, x'_i, y'_i – koordinatės, nustatytos pagal pirmojo tinklo matavimo rezultatus, x_i, y_i – koordinatės, nustatytos pagal antrojo tinklo matavimo rezultatus.

Tenzorių (2.1.31) galima išskaidyti dvi dalis (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005):

$$\|T\| = \|A\| + \|W\|, \quad (2.1.40)$$

čia (Zakarevičius 2003; Chang *et al* 2003):

$$\|A\| = \left\| \begin{array}{cc} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{yy} \end{array} \right\|, \quad (2.1.41)$$

$$\|W\| = \left\| \begin{array}{cc} 0 & \frac{1}{2}(e_{xy} - e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} - e_{xy}) & 0 \end{array} \right\|, \quad (2.1.42)$$

čia e_{xx} , e_{yy} – santykinės linijinės deformacijos, e_{xy} , e_{yx} – santykinės šlyties deformacijos.

Deformacijų tenzoriaus koeficientai $\frac{1}{2}$, esantys prie santykinų šlyties deformacijų, taikomi tam, kad tiek deformacijų tenzoriaus, tiek įtempių tenzoriaus elementai, pereinant nuo vienos koordinačių sistemos prie kitos, būtų perskaičiuojami pagal tas pačias formules (Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Atkočiūnas, Nagevičius 2004).

Svarbiausias tikrąsias, tarpusavyje statmenas, santykinės deformacijas apibūdina simetrinio tenzoriaus (2.4.41) tikrinės reikšmės (Jin, Park 2007a, 2007b; Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005):

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left((e_{xx} + e_{yy}) \pm \sqrt{(e_{xx} + e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2} \right), \quad (2.1.43)$$

čia E_1 – didžiausias santykinis pailgėjimas, E_2 – mažiausias santykinis pailgėjimas.

Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis abscisių ašies atžvilgiu apskaičiuojama (Jin, Park 2007a, 2007b; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Schneider 1982):

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{e_{xy} + e_{yx}}{e_{xx} - e_{yy}} \right) + \begin{cases} 90^\circ, & \text{kai } (e_{xx} - e_{yy}) > 0 \\ 0^\circ, & \text{kai } (e_{xx} - e_{yy}) < 0 \end{cases}. \quad (2.1.44)$$

Baigtinio elemento dilatacija (Dermanis 1981; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005):

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy}, \quad (2.1.45)$$

Santykinės deformacijos pagal koordinačių ašis (Jin, Park 2007a, 2007b; Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005; Dermanis 1981):

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{xx} - e_{yy} \\ e_{xy} + e_{yx} \end{bmatrix}, \quad (2.1.46)$$

o viso poslinkio modulis:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (2.1.47)$$

Baigtinio elemento, kaip absoliučiai tvirto kūno, postūmis ir posūkis apskaičiuojamas iš nesimetrinio deformacijų tenzoriaus (2.1.42) (Zakarevičius 2003; Chang *et al.* 2003):

$$\omega'' = \frac{\rho''}{2} (e_{xy} - e_{yx}), \quad (2.1.48)$$

čia $\rho'' = 206264,81'' \approx 206265''$.

Pagal (2.1.18) apskaičiuotas kampas apibūdina tik bendrą baigtinio elemento (trikampio) posūkį, kuris baigtinio elemento viduje ne visuomet yra vienodas.

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų tenzoriaus elementus galima įvertinti mažiausiųjų kvadratų metodu (Arciniega, Reddy 2007; Bird 1999; Dyksterhuis *et al.* 2005; Hughes 2000; Lesne *et al.* 1998; Rao 1999; Zienkiewicz, Taylor 2000).

Tuomet dvimatėje erdvėje tolygiai besideformuojančio kūno laisvasis taškų poslinkio modelis yra (Stanionis 2005; Zakarevičius *et al.* 2006; Arciniega, Reddy 2007; Bird 1999; Hughes 2000; Lesne *et al.* 1998):

$$\Delta X = H \cdot T, \quad (2.1.49)$$

čia ΔX – punktų koordinačių poslinkių vektorius, H – punktų koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica, T – Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų parametrų vektorius.

Punktų koordinačių poslinkių vektorius yra:

$$\Delta X = [\Delta x_1 \quad \Delta y_1 \quad \Delta x_2 \quad \Delta y_2 \quad \dots \quad \Delta x_n \quad \Delta y_n]^T. \quad (2.1.50)$$

Punktų koordinačių poslinkiai Δx_i , Δy_i gaunami:

$$\Delta x_i = x'_i - x_i, \quad (2.1.51)$$

$$\Delta y_i = y'_i - y_i, \quad (2.1.52)$$

čia x_i, y_i – pirmojo matavimo tinklo punktų koordinatės, x'_i, y'_i – antrojo matavimo tinklo punktų koordinatės, $i = 1, 2, \dots, n$.

Punktų koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{s_1} & x_{s_1} & 0 & y_{s_1} \\ 0 & 1 & x_{s_1} & 0 & y_{s_1} & x_{s_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_{s_i} & x_{s_i} & 0 & y_{s_i} \\ 0 & 1 & x_{s_i} & 0 & y_{s_i} & x_{s_i} \end{bmatrix}. \quad (2.1.53)$$

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų parametrų vektorius:

$$T = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \omega \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2.1.54)$$

čia α_x, α_y – bloko poslinkiai abscisių ir ordinačių kryptimis, ω – struktūrinio bloko poslinkis, $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ – santykinės linijinės deformacijos, ε_{xy} – santykinė šlyties deformacija.

Trikampės formos plokščiąjį baigtinį elementą riboja trys viršūnės. Tuomet vektoriuje (2.1.50) bus šeši nariai, o matricoje (2.1.53) – bus šešios eilutės.

Kai baigtiniame elemente imami ne tik viršūnių koordinačių pokyčiai, bet ir daugiau taškų su išmatuotais koordinačių pokyčiais, arba nagrinėjant apibendrintąsias Žemės plutos deformacijas didesnėse teritorijose, sudarytose iš kelių trikampių baigtinių elementų, polinkių vektorius (2.1.50) bus $2 \cdot n$ narių, bei matricoje (2.1.53) $2 \cdot n$ eilučių (čia n – taškų su žinomais koordinačių pokyčiais skaičius).

Mažiausiųjų kvadratų metodu įvertintų deformacijų parametrų vektorius:

$$T = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot \Delta X. \quad (2.1.55)$$

Turint apskaičiuotas horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrų vektoriaus T reikšmes, galime rasti daugiakampio geometrinės figūros ar struktūrinio bloko svarbiausias santykinės didžiausiojo ir mažiausiojo pailgėjimo reikšmes:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\Delta \pm \Gamma), \quad (2.1.56)$$

čia

$$\Gamma = \sqrt{(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})^2 + (2 \cdot \varepsilon_{xy})^2}, \quad (2.1.57)$$

čia E_1 – didžiausias santykinis pailgėjimas, E_2 – mažiausias santykinis pailgėjimas.

Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}} \right). \quad (2.1.58)$$

2.2. Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas

Atsižvelgiant į tai, kad deformacijų tenzoriaus elementai yra kelių kintamųjų, o deformacijų rodikliai yra deformacijų tenzoriaus elementų funkcijos, nustatytų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumui įvertinti, siūloma taikyti kelių kintamųjų funkcijų tikslumo įvertinimo metodiką (Čekanavičius, Murauskas 2006, 2008).

2.2.1. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas

Tarkime, nagrinėjamoju atveju, kelių kintamųjų funkcija yra:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.2.1)$$

Kelių kintamųjų funkcijos (2.2.1) vidutinės kvadratinės paklaidos kvadrata galime išreikšti:

$$m_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \cdot m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \cdot m_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \cdot m_{x_n}^2. \quad (2.2.2)$$

Tuomet erdvinių Žemės plutos deformacijų antrojo rango deformacijų tenzoriaus (2.1.1) komponentų vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratai apskaičiuojami pagal (2.2.2) formulę.

Antrojo rango deformacijų tenzoriaus komponentų vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratas yra:

$$m_{e_{ij}} = \frac{m_{D_{ij}}}{D}, \quad (2.2.3)$$

čia $m_{D_{ij}}$ – determinanto D_{ij} vidutinė kvadratinė paklaida.

Taikant Legranžo deformacijų modelį, priimame, kad determinantas $D = \text{const}$. Atsižvelgiant į tai, determinantų (2.1.7)–(2.1.15) vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratai nustatomi taip:

$$m_{D_{11}}^2 = \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2, \quad (2.2.4)$$

$$m_{D_{12}}^2 = \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2, \quad (2.2.5)$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{13}}^2 = & \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \\
& + \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.6}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{21}}^2 = & \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
& + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.7}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{22}}^2 = & \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
& + \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.8}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{23}}^2 = & \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
& + \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.9}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{31}}^2 = & \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 + \\
& + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.10}$$

$$m_{D_{32}}^2 = \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2, \quad (2.2.11)$$

$$m_{D_{33}}^2 = \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_4} \right)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2, \quad (2.2.12)$$

Prieš skaičiuojant dalines išvestines, determinantai (2.1.7)–(2.1.15) išskleidžiami Δx , Δy , Δz , minorų ir jų algebrinių papildymų suma.

Algebriniai papildymai yra nepriklausomi nuo Δx , Δy , Δz , tuomet, skaičiuojant atitinkamus determinantus, jų algebriniai papildymai tampa konstantomis. Toks pertvarkymas palengvina išvestinių skaičiavimą.

Dalinės išvestinės, įeinančios į (2.2.3)–(2.2.11) formules bus:

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_1} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_1} \right) = \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_1} \right) =$$

$$= y_3 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_3 + y_2 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_2 - y_3 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_3, \quad (2.2.13)$$

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_2} \right) =$$

$$= y_1 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_1 + y_1 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_1 + y_3 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_3, \quad (2.2.14)$$

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_3} \right) =$$

$$= y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_2 + y_1 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_1 - y_2 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_2, \quad (2.2.15)$$

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_4} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_4} \right) = \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial \Delta z_4} \right) =$$

$$= y_1 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_3 + y_3 \cdot z_1 + y_2 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_2, \quad (2.2.16)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_1} \right) &= \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_1} \right) = \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_1} \right) = \\ &= x_2 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_2 + x_3 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_3, \end{aligned} \quad (2.2.17)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_2} \right) &= \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_2} \right) = \\ &= x_3 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_3 + x_1 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_1 - x_3 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_3, \end{aligned} \quad (2.2.18)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_3} \right) &= \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_3} \right) = \\ &= x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_1 + x_2 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_2, \end{aligned} \quad (2.2.19)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_4} \right) &= \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_4} \right) = \left(\frac{\partial D_{32}}{\partial \Delta z_4} \right) = \\ &= x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_3 + x_3 \cdot z_2, \end{aligned} \quad (2.2.20)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_1} \right) &= \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_1} \right) = \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_1} \right) = \\ &= x_3 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_2 - x_3 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_3, \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_2} \right) &= \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_2} \right) = \\ &= x_1 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_3, \end{aligned} \quad (2.2.22)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_3} \right) &= \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_3} \right) = \\ &= x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 + x_1 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_1 - x_2 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_2, \end{aligned} \quad (2.2.23)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_{13}}{\partial \Delta x_4} \right) &= \left(\frac{\partial D_{23}}{\partial \Delta y_4} \right) = \left(\frac{\partial D_{33}}{\partial \Delta z_4} \right) = \\ &= x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2. \end{aligned} \quad (2.2.24)$$

Remiantis (2.2.4)–(2.2.12) bei (2.2.13)–(2.2.24) formulėmis, determinantų vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratai yra:

$$\begin{aligned}
 m_{D_{11}}^2 = & (y_3 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_3 + y_2 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_2 - y_3 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \\
 & + (y_1 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_1 + y_1 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_1 + y_3 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \\
 & + (y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_2 + y_1 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_1 - y_2 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \\
 & + (y_1 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_3 + y_3 \cdot z_1 + y_2 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2,
 \end{aligned} \tag{2.2.25}$$

$$\begin{aligned}
 m_{D_{12}}^2 = & (x_2 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_2 + x_3 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \\
 & + (x_3 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_3 + x_1 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_1 - x_3 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \\
 & + (x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_1 + x_2 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \\
 & + (x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_3 + x_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2,
 \end{aligned} \tag{2.2.26}$$

$$\begin{aligned}
 m_{D_{13}}^2 = & (x_3 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_2 - x_3 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \\
 & + (x_1 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \\
 & + (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 + x_1 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_1 - x_2 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2 + \\
 & + (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta x_4}^2,
 \end{aligned} \tag{2.2.27}$$

$$\begin{aligned}
 m_{D_{21}}^2 = & (y_3 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_3 + y_2 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_2 - y_3 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \\
 & + (y_1 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_1 + y_1 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_1 + y_3 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \\
 & + (y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_2 + y_1 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_1 - y_2 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
 & + (y_1 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_3 + y_3 \cdot z_1 + y_2 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
 \end{aligned} \tag{2.2.28}$$

$$\begin{aligned}
 m_{D_{22}}^2 = & (x_2 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_2 + x_3 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \\
 & + (x_3 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_3 + x_1 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_1 - x_3 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \\
 & + (x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_1 + x_2 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
 & + (x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_3 + x_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
 \end{aligned} \tag{2.2.29}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{23}}^2 = & (x_3 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_2 - x_3 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \\
& + (x_1 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \\
& + (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 + x_1 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_1 - x_2 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2 + \\
& + (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta y_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.30}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{31}}^2 = & (y_3 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_3 + y_2 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_2 - y_3 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \\
& + (y_1 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_1 + y_1 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_1 + y_3 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \\
& + (y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_2 + y_1 \cdot z_4 - y_4 \cdot z_1 - y_2 \cdot z_4 + y_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 + \\
& + (y_1 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_3 + y_3 \cdot z_1 + y_2 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.31}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{32}}^2 = & (x_2 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_2 + x_3 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \\
& + (x_3 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_3 + x_1 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_1 - x_3 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_3)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \\
& + (x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_4 + x_4 \cdot z_1 + x_2 \cdot z_4 - x_4 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 + \\
& + (x_2 \cdot z_1 - x_1 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_3 + x_3 \cdot z_2)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2,
\end{aligned} \tag{2.2.32}$$

$$\begin{aligned}
m_{D_{33}}^2 = & (x_3 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_2 - x_3 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta z_1}^2 + \\
& + (x_1 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_3)^2 \cdot m_{\Delta z_2}^2 + \\
& + (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 + x_1 \cdot y_4 - x_4 \cdot y_1 - x_2 \cdot y_4 + x_4 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta z_3}^2 + \\
& + (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)^2 \cdot m_{\Delta z_4}^2.
\end{aligned} \tag{2.2.33}$$

Atsižvelgiant į (2.2.3), (2.2.25)–(2.2.33), deformacijų tenzorius komponentų vidutinės kvadratinės paklaidos bus:

$$m_{e_{11}} = \frac{m_{D_{11}}}{D}, \tag{2.2.34}$$

$$m_{e_{12}} = \frac{m_{D_{12}}}{D}, \tag{2.2.35}$$

$$m_{e_{13}} = \frac{m_{D_{13}}}{D}, \quad (2.2.36)$$

$$m_{e_{21}} = \frac{m_{D_{21}}}{D}, \quad (2.2.37)$$

$$m_{e_{22}} = \frac{m_{D_{22}}}{D}, \quad (2.2.38)$$

$$m_{e_{23}} = \frac{m_{D_{23}}}{D}, \quad (2.2.39)$$

$$m_{e_{31}} = \frac{m_{D_{31}}}{D}, \quad (2.2.40)$$

$$m_{e_{32}} = \frac{m_{D_{32}}}{D}, \quad (2.2.41)$$

$$m_{e_{33}} = \frac{m_{D_{33}}}{D}. \quad (2.2.42)$$

I (2.2.25)–(2.2.33) formules įeinančios punktų koordinačių pokyčių vidutinės kvadratinės paklaidos apskaičiuojamos taip:

$$m_{\Delta x_i} = \sqrt{m_{x_i}^2 + m_{x_i'}^2}, \quad (2.2.43)$$

$$m_{\Delta y_i} = \sqrt{m_{y_i}^2 + m_{y_i'}^2}, \quad (2.2.44)$$

$$m_{\Delta z_i} = \sqrt{m_{z_i}^2 + m_{z_i'}^2}, \quad (2.2.45)$$

čia m_{x_i} , m_{y_i} , m_{z_i} – pirmojo matavimo punktų koordinačių vidutinės kvadratinės paklaidos, $m_{x_i'}$, $m_{y_i'}$, $m_{z_i'}$ – antrojo matavimo punktų koordinačių vidutinės kvadratinės paklaidos.

2.2.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimas

Tarkime, nagrinėjamoju atveju, kaip įvertinant erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumą, kelių kintamųjų funkcija yra (2.2.1), o funkcijos vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratas yra (2.2.2) formulė.

Tuomet, pritaikius (2.2.2) formulę, didžiausio bei mažiausio santykinio pailgėjimo (2.1.43) vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratas būtų:

$$m_{E_1}^2 = \left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{xx}} \right)^2 \cdot m_{e_{xx}}^2 + \left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{yy}} \right)^2 \cdot m_{e_{yy}}^2 + \left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{xy}} \right)^2 \cdot m_{e_{xy}}^2 + \left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{yx}} \right)^2 \cdot m_{e_{yx}}^2, \quad (2.2.46)$$

$$m_{E_2}^2 = \left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{xx}} \right)^2 \cdot m_{e_{xx}}^2 + \left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{yy}} \right)^2 \cdot m_{e_{yy}}^2 + \left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{xy}} \right)^2 \cdot m_{e_{xy}}^2 + \left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{yx}} \right)^2 \cdot m_{e_{yx}}^2. \quad (2.2.47)$$

Dalinės išvestinės, esančios (2.2.46)–(2.2.47) formulėse, randamos diferencijuojant (2.1.43) pagal kintamuosius e_{xx} , e_{yy} , e_{xy} , e_{yx} :

$$\left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{xx}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{e_{xx} - e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}} \right), \quad (2.2.48)$$

$$\left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{yy}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{e_{xx} - e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}} \right), \quad (2.2.49)$$

$$\left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{xy}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e_{xx} + e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}}, \quad (2.2.50)$$

$$\left(\frac{\partial E_1}{\partial e_{yx}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e_{xx} + e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}}, \quad (2.2.51)$$

$$\left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{xx}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{e_{xx} - e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}} \right), \quad (2.2.52)$$

$$\left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{yy}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{e_{xx} - e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}} \right), \quad (2.2.53)$$

$$\left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{xy}} \right) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e_{xx} + e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}}, \quad (2.2.54)$$

$$\left(\frac{\partial E_2}{\partial e_{yx}} \right) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e_{xx} + e_{yy}}{\sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2}}. \quad (2.2.55)$$

Baigtinio elemento dilatacija (2.1.45) yra tenzorius elementų e_{xx} , e_{yy} funkcija, kurios vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratas, atsižvelgiant į (2.2.2), yra:

$$m_{\Delta}^2 = \left(\frac{\partial \Delta}{\partial e_{xx}} \right)^2 \cdot m_{e_{xx}}^2 + \left(\frac{\partial \Delta}{\partial e_{yy}} \right)^2 \cdot m_{e_{yy}}^2. \quad (2.2.56)$$

Dalinės išvestinės, įeinančios į (2.2.56), randamos pagal deformacijų tenzorius (2.1.31) elementus e_{xx} , e_{yy} :

$$\left(\frac{\partial \Delta}{\partial e_{xx}} \right) = 1, \quad (2.2.57)$$

$$\left(\frac{\partial \Delta}{\partial e_{yy}} \right) = 1. \quad (2.2.58)$$

Atsižvelgiant į tai, jog (2.2.57) ir (2.1.58) esančių dalinių išvestinių reikšmės lygios 1, baigtinio elemento dilatacijos vidutinės kvadratinės paklaidos kvadratą galime apskaičiuoti taip:

$$m_{\Delta}^2 = m_{e_{xx}}^2 + m_{e_{yy}}^2. \quad (2.2.59)$$

Antrojo rango deformacijų tenzorius (2.1.31) komponentų vidutinė kvadratinė paklaida yra:

$$m_{e_{ij}} = \frac{m_{D_{ij}}}{D}, \quad (2.2.60)$$

čia $m_{D_{ij}}$ – determinanto D_{ij} vidutinė kvadratinė paklaida.

Taikant Legranžo deformacijų modelį, priimame, kad determinantas $D = \text{const}$. Tuomet determinantų, nurodytų (2.1.36)–(2.1.39), vidutinių kvadratinų paklaidų kvadratai yra:

$$m_{D_{11}}^2 = \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2, \quad (2.2.61)$$

$$m_{D_{22}}^2 = \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2, \quad (2.2.62)$$

$$m_{D_{12}}^2 = \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2, \quad (2.2.63)$$

$$m_{D_{21}}^2 = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_1} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_2} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_3} \right)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2. \quad (2.2.64)$$

Determinantus, nurodytus (2.1.36)–(2.1.39), skleidžiant adjunktų ir algebrinių papildymų sandaugų suma, galime išreikšti ir taip:

$$D_{11} = -\Delta x_1 \begin{vmatrix} 1 & y_2 \\ 1 & y_3 \end{vmatrix} + \Delta x_2 \begin{vmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_3 \end{vmatrix} - \Delta x_3 \begin{vmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{vmatrix}, \quad (2.2.65)$$

$$D_{22} = \Delta y_1 \begin{vmatrix} 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \end{vmatrix} - \Delta y_2 \begin{vmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_3 \end{vmatrix} + \Delta y_3 \begin{vmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{vmatrix}, \quad (2.2.66)$$

$$D_{12} = \Delta x_1 \begin{vmatrix} 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \end{vmatrix} - \Delta x_2 \begin{vmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_3 \end{vmatrix} + \Delta x_3 \begin{vmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{vmatrix}, \quad (2.2.67)$$

$$D_{21} = -\Delta y_1 \begin{vmatrix} 1 & y_2 \\ 1 & y_3 \end{vmatrix} + \Delta y_2 \begin{vmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_3 \end{vmatrix} - \Delta y_3 \begin{vmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{vmatrix}. \quad (2.2.68)$$

Tuomet į (2.2.65)–(2.2.68) įeinančios dalinės išvestinės bus:

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_1} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_1} \right) = y_3 - y_2, \quad (2.2.69)$$

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_2} \right) = y_3 - y_1, \quad (2.2.70)$$

$$\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial \Delta x_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial \Delta y_2} \right) = y_2 - y_1, \quad (2.2.71)$$

$$\left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_1} \right) = x_3 - x_2, \quad (2.2.72)$$

$$\left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_2} \right) = \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_2} \right) = x_3 - x_1, \quad (2.2.73)$$

$$\left(\frac{\partial D_{12}}{\partial \Delta x_3} \right) = \left(\frac{\partial D_{22}}{\partial \Delta y_3} \right) = x_2 - x_1. \quad (2.2.74)$$

Atsižvelgiant į (2.2.61)–(2.2.64) ir (2.2.69)–(2.2.74), determinantų vidutinių kvadratinų paklaidų kvadratai bus:

$$m_{D_{11}}^2 = (y_3 - y_2)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + (y_3 - y_1)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + (y_2 - y_1)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2, \quad (2.2.75)$$

$$m_{D_{22}}^2 = (x_3 - x_2)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + (x_3 - x_1)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + (x_2 - x_1)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2, \quad (2.2.76)$$

$$m_{D_{12}}^2 = (x_3 - x_2)^2 \cdot m_{\Delta x_1}^2 + (x_3 - x_1)^2 \cdot m_{\Delta x_2}^2 + (x_2 - x_1)^2 \cdot m_{\Delta x_3}^2, \quad (2.2.77)$$

$$m_{D_{21}}^2 = (y_3 - y_2)^2 \cdot m_{\Delta y_1}^2 + (y_3 - y_1)^2 \cdot m_{\Delta y_2}^2 + (y_2 - y_1)^2 \cdot m_{\Delta y_3}^2. \quad (2.2.78)$$

Atsižvelgiant į (2.2.60), (2.2.75)–(2.2.78), deformacijų tenzoriaus komponentų vidutinės kvadratinės paklaidos bus:

$$m_{e_{11}} = \frac{m_{D_{11}}}{D}, \quad (2.2.79)$$

$$m_{e_{12}} = \frac{m_{D_{12}}}{D}, \quad (2.2.80)$$

$$m_{e_{21}} = \frac{m_{D_{21}}}{D}, \quad (2.2.81)$$

$$m_{e_{22}} = \frac{m_{D_{22}}}{D}. \quad (2.2.82)$$

I (2.2.61)–(2.2.64) ir (2.2.79)–(2.2.82) įeinančios punktų koordinačių pokyčių vidutinės kvadratinės paklaidos apskaičiuojamos taip:

$$m_{\Delta x_i} = \sqrt{m_{x_i}^2 + m_{x_i'}^2}, \quad (2.2.83)$$

$$m_{\Delta y_i} = \sqrt{m_{y_i}^2 + m_{y_i'}^2}, \quad (2.2.84)$$

čia m_{x_i} , m_{y_i} – pirmojo matavimo punktų koordinačių vidutinės kvadratinės paklaidos, $m_{x_i'}$, $m_{y_i'}$ – antrojo matavimo punktų koordinačių vidutinės kvadratinės paklaidos.

2.3. Žemės plutos geodinaminių įtempimų pokyčių nustatymas

Nagrinėjant Žemės plutos judesius geodeziniais metodais, žymiai detalesnis gautųjų rezultatų interpretavimas geodinaminiu požiūriu yra tuomet, kai gautieji rezultatai išreiškiami ne santykiniais dydžiais (Žemės plutos deformacijų charakteristikų nustatymo atveju), o mato vienetais (Stanionis 2005). Tokiu matu galėtų būti įtempis, kuris išreiškia jėgos vienetus tenkančius ploto vienetui.

Mechanikoje įtempių būvis nusakomas įtempio vektoriumi stulpeliu (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{yz}]^T, \quad (2.3.1)$$

arba simetriniu įtempių tenzoriumi, kurio pagrindinė savybė yra invariantiškumas:

$$\tilde{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2.3.2)$$

Esant plokštuminiam įtempių būviui, įtempiai $\sigma_{xz} = 0$, $\sigma_{zx} = 0$, $\sigma_{yz} = 0$, $\sigma_{zy} = 0$, $\sigma_{zz} = 0$ (Atkočiūnas, Nagevičius 2004).

Pagal tangentinių įtempių dualumo dėsnį, įtempiai $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$. Tuomet įtempių būvį plokštumoje nusakantis simetrinis įtempių tenzorius bus (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\tilde{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2.3.3)$$

Deformacijos ir įtempiai susiję fizine (funkcine) priklausomybe (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\varepsilon = K \cdot \sigma, \quad (2.3.4)$$

čia σ – įtempių vektorius, K – standumo matrica, E – deformacijų vektorius.

Pirmasis šią priklausomybę (2.3.4) pastebėjo ir suformulavo dėsnį (Huko dėsnį) 1676 m. anglų mokslininkas Robertas Hukas. Atvirkštinis Huko dėsnis yra (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma = K \cdot \varepsilon. \quad (2.3.5)$$

Atsižvelgiant į tai, kas išdėstyta, geodinaminių įtempių pokyčius, įvykusius laiko intervale tarp kartotinių geodezinių matavimų, galime įvertinti pritaikę atvirkštinį Huko dėsnį (2.3.5).

2.3.1. Erdvinių Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčių nustatymas

Matricine forma užrašyto Huko dėsnio (2.3.4) deformacijų vektorius ε yra (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zz} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} \end{bmatrix}^T, \quad (2.3.6)$$

čia ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} – santykinės linijinės deformacijos, ε_{xy} , ε_{xz} , ε_{yz} – santykinės šlyties deformacijos.

Standumo matrica K užrašoma taip (Aalto, Salonen 1976; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$K = \begin{bmatrix} (2G + \lambda) & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & (2G + \lambda) & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & (2G + \lambda) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \quad (2.3.7)$$

čia λ – Lamé koeficientas (Jin, Park 2007a, 2007b; Coda, Paccola 2008):

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = \frac{2\nu \cdot G}{1 - 2\nu}. \quad (2.3.8)$$

Mechaniniai rodikliai: šlyties modulis G , Jungo (tamprumo) modulis ir Puasono koeficientas $\nu = 0,25$ yra susieti priklausomybe (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (2.3.9)$$

Taikant atvirkštinį Huko dėsnį, pagal apskaičiuotas erdvines Žemės plutos deformacijas, erdvių normalinių ir tangentialinių įtempių pokyčius įvertiname taip (Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Zakarevičius *et al.* 2009):

$$\sigma_{xx} = 2G\varepsilon_{xx} + \lambda\vartheta, \quad (2.3.10)$$

$$\sigma_{yy} = 2G\varepsilon_{yy} + \lambda\vartheta, \quad (2.3.11)$$

$$\sigma_{zz} = 2G\varepsilon_{zz} + \lambda\vartheta, \quad (2.3.12)$$

$$\sigma_{xy} = G \cdot \varepsilon_{xy}, \quad (2.3.13)$$

$$\sigma_{xz} = G \cdot \varepsilon_{xz}, \quad (2.3.14)$$

$$\sigma_{yz} = G \cdot \varepsilon_{yz}, \quad (2.3.15)$$

čia ϑ – pirmasis deformacijų tenzoriaus ε invariantas I_1 .

Svarbiausiųjų erdvių įtempių pokyčiai σ gaunami išsprendus kubinę lygtį (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 - I_3 = 0, \quad (2.3.16)$$

čia I_1 , I_2 , I_3 – įtempių būvio invariantai arba tiesiog įtempių tenzoriaus $\tilde{\sigma}$ invariantai (kai tangentiniai įtempiai yra lygūs nuliui):

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}, \\ I_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz}, \\ I_3 = \sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz}. \end{cases} \quad (2.3.17)$$

Invariantus I_2 , I_3 galima parašyti ir taip (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}, \quad (2.3.18)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}. \quad (2.3.19)$$

Kubinei lygčiai (2.3.16) spręsti trigonometriniu būdu, galime pakeisti kintamuosius (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma = x + \frac{1}{3}I_1. \quad (2.3.20)$$

Tuomet (2.3.16) lygtis užrašoma (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$x^3 + 3p + 2q = 0, \quad (2.3.21)$$

Koeficientai p ir q , esantys (2.3.21) formulėje, apskaičiuojami taip (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$p = \frac{1}{3} \left(I_2 - \frac{1}{3} I_1^2 \right), \quad (2.3.22)$$

$$q = -\frac{1}{27} I_1^3 + \frac{1}{6} I_1 I_2 - \frac{1}{2} I_3. \quad (2.3.23)$$

Kubinės lygties (2.3.21) visos trys šaknys yra realios, kai diskriminantas $\Delta = p^3 + q^2 < 0$ (Atkočiūnas, Nagevičius 2004). Nagrinėjamu atveju diskriminantas Δ visada neigiamas. Kai $\Delta < 0$, kubinę lygtį (2.3.21) galime spręsti trigonometriniu metodu. Tokiu atveju (2.3.21) lygties šaknys x_1, x_2, x_3 išreiškiamos taip (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$x_1 = 2\sqrt{|p|} \cos \varphi, \quad (2.3.24)$$

$$x_2 = 2\sqrt{|p|} \cos(\varphi + 120^\circ), \quad (2.3.25)$$

$$x_3 = 2\sqrt{|p|} \cos(\varphi - 120^\circ), \quad (2.3.26)$$

čia $|p|$ – absoliučioji koeficiento reikšmė, $\varphi = \frac{1}{3} \arccos \frac{-q}{\sqrt[3]{|p|^2}}$.

Paeiliui įrašius gautąsias x_1, x_2, x_3 šaknis į priklausomybę (2.3.20), gaunamos svarbiausiųjų geodinaminių įtėmpių $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ reikšmės, kurios $\sigma_{xx} \geq \sigma_{yy} \geq \sigma_{zz}$ (Atkočiūnas, Nagevičius 2004).

2.3.2. Horizontaliųjų Žemės plutos geodinaminių įtėmpių pokyčių nustatymas

Atvirkštinio Huko dėsnio (2.3.5) formulėje esantys nariai, įvertinant geodinaminių įtėmpių pokyčius plokštumoje bus (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.3.27)$$

$$K = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.3.28)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.3.29)$$

Esant plokštuminiam įtempių būviui, įtempiai $\sigma_{xz} = 0$, $\sigma_{yz} = 0$, $\sigma_{zy} = 0$. Pritaikius atvirkštinį Huko dėsnį (2.3.5), t. y. geodinaminius įtempius išreiškus deformacijomis, gauname (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{xx} + \nu \cdot \varepsilon_{yy}), \quad (2.3.30)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{yy} + \nu \cdot \varepsilon_{xx}), \quad (2.3.31)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \varepsilon_{xy}, \quad (2.3.32)$$

čia σ_{xx} , σ_{yy} – normalinių geodinaminių įtempių pokyčiai, σ_{xy} – tangentinių geodinaminių įtempių pokyčiai.

Svarbiausių geodinaminių įtempių pokyčiai plokštumoje σ gaunami išsprendus kvadratinę lygtį (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma^2 - I_1\sigma + I_2 = 0, \quad (2.3.33)$$

čia σ – svarbiausieji tektoniniai įtempiai.

Lygtis (2.3.33) yra gaunama išskleidus determinantą (Atkočiūnas, Nagevičius 2004; Stanionis 2005):

$$\det \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{vmatrix} = 0. \quad (2.3.34)$$

Įtempių būvio invariantai, esantys (2.3.33) lygtyje, yra (Hori, Kameda, Tako 2000; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}, \\ I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{vmatrix}. \end{cases} \quad (2.3.35)$$

Lygties (2.3.33) sprendiniai yra (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma_{1,2} = \frac{I_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{I_1}{2}\right)^2 - I_2}, \quad (2.3.36)$$

kur σ_1 – maksimalus svarbiausiasis tektoninis įtempis, σ_2 – minimalus svarbiausiasis tektoninis įtempis, $\sigma_1 \geq \sigma_2$.

Medžiagų mechanikoje kvadratinės lygties (2.3.33) šaknys skaičiuojamos pagal formulę, tiesiogiai išvengiant įtempio būvio invariantų (2.3.35) (Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}. \quad (2.3.37)$$

2.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių bei įtėmpių pokyčių įvertinimas, atsižvelgiant į Žemės formos sferoidiškumą

Tiriant horizontaliuosius Žemės plutos judesius, dažniausiai Žemės plutos deformacijų rodikliai ir jų skaida teritorijoje nagrinėjama plokštuminėje koordinatinių sistemoje, pasirenkant tam tikrą kartografinę projekcijos plokštumą. Šiuo atveju, Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimui, panaudojami pasirinktos kartografinės projekcijos plokštumoje apskaičiuotų geodezinių ženklų koordinatinių pokyčiai per tam tikrą laiko tarpą.

Tokia tyrimų koncepcija gali būti taikoma atliekant tyrimus nedidelėse teritorijose. Lokaliuose teritorijose, tinkamai parinkus kartografinę projekciją, geodezinių matavimų deformacijos, atsiradusios projektuojant į kartografinę projekcijos plokštuminę koordinatinių sistemą, deformacijų parametrų įverčiams lemiamos įtakos neturės. Taip pat nedidelėse teritorijose nėra didesnių sunkumų ir analizuojant Žemės plutos deformacijų rodiklių skaidą bei jų geotektoninį interpretavimą.

Nagrinėjant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas didelėse teritorijose, kai tyrimų arealo ribos siekia tūkstančius kilometrų, tokia tyrimų metodika turės esminių trūkumų. Didelėse teritorijose, matavimų duomenis redukuojant į vieningą visai teritorijai kartografinę projekciją, dėl žymesnių projekcijos mastelio nuokrypių nuo vieneto bei projekcijos mastelio kaitos, tyrimų teritorijoje Žemės plutos rodiklių įverčiai bei jų skaidos dėsningumai yra ženkliai ir sistemingai deformuoti.

Erdvinės Žemės plutos deformacijos, taikant kosminėmis technologijomis gautus kartotinių geodezinių matavimų duomenis, daugelyje atvejų nagrinėjamos erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje geocentrinėje koordinatinių sistemoje, t. y. bendrojoje Žemės geodezinėje koordinatinių sistemoje.

Atsižvelgiant į tai, deformacijų rodiklius ir Žemės plutos įtempius pagal geodezinių ženklų koordinacių pokyčius per laiko intervalą tarp kartotinių matavimų įvertinti nesudėtinga.

Didžiausia problematika, nagrinėjant erdvines Žemės plutos deformacijas, atsiranda tuomet, kai reikia atlikti jų skaidos analizę bei geotektoninį interpretavimą, kadangi deformacijų rodiklių orientavimas Žemės kūno atžvilgiu nesusietas su Žemės paviršiaus sferoidiškumu.

Taigi, tiriant erdvines Žemės plutos deformacijas ir įtempius bei jų skaidą, o taip pat, atliekant geodeziniais matavimais nustatytų erdvių Žemės plutos deformacijų geotektoninį interpretavimą, reikalinga išskirti dvi komponentes: horizontaliąją, kuri orientuojama dienovidinio atžvilgiu, ir vertikaliją, orientuotą normalės kryptimi.

Dėl aukščiau minėtų priežasčių, Žemės plutos judesių pagal geodezinių matavimų duomenis tyrimams, reikalingi metodologiniai principai ir jais remiantis parengti būdai bei metodai, įvertinant Žemės formos sferoidiškumą, t. y. kad deformacijų rodikliai būtų kuo mažiau paveikti geodezinių matavimų transformacijų į atitinkamas koordinacių sistemas ir aiškiai orientuoti sferoidinio Žemės paviršiaus šiaurės–pietų, vakarų–rytų bei normalės kryptimis.

2.4.1. Žemės paviršiaus sferoidiškumo įvertinimo metodologiniai principai

Nagrinėjant Žemės plutos judesius, tyrimai turi būti atliekami pagal tiesioginius Žemės paviršiuje įrengtų geodezinių ženklų erdvių koordinacių pokyčius, įvykusius per laikotarpį tarp kartotinių matavimų, t. y. turi būti taikomos tokios koordinacių sistemos ir koordinacių perskaičiavimo iš vienos sistemos į kitą būdai, kad geodezinių ženklų poslinkių absoliučiosios reikšmės išliktų tos pačios. Kitaip sakant, kad transformuojant koordinates iš vienos koordinacių sistemos į kitą, projekcijos mastelis neturėtų įtakos punktų koordinacių pokyčiams.

Atsižvelgiant į aukščiau minėtas sąlygas bei Žemės plutos deformacijoms nustatyti naudojamas geodezinių ženklų koordinates, vienas iš metodologinių principų galėtų būti Žemės paviršių tam tikru tikslumu aproksimuoti taisyklingu matematiniu paviršiumi – sferoidu arba elipsoidu. Aproksimuojant sferoidu, tikslumas yra mažesnis, o aproksimuojant elipsoidu, – didesnis. Atsižvelgiant į pasirinktą aproksimacinį paviršių, t. y. sferoidu arba elipsoidą, yra perskaičiuojami matavimų duomenys.

Tokiu atveju, deformacijų rodikliai skaičiuojami sferoidinėje koordinacių sistemoje (Barauskas, Belevičius, Kačianauskas 2004), taikant erdvines polines koordinates. Tačiau šiuo atveju yra gana sudėtingi skaičiavimai.

Kitas būdas, panašiai kaip skaičiuojant kevalines konstrukcijas, galėtų būti sudėtingos formos fizinį Žemės paviršių modeliuojant baigtiniais plokštuminiais elementais. Atsižvelgiant į geodezinių matavimų ypatumus (Skeivalas *et al.* 1998; Skeivalas 2008; Petroškevičius, Ramanauskas 1995; Petroškevičius *et al.* 1997; Kazakevičius *et al.* 1997; Dermanis 1981), kreivos Žemės formos paviršiaus modeliavimui, tinkamiausi yra plokštieji trikampiai baigtiniai elementai.

Tokiu atveju, Žemės plutos deformacijų rodikliai įvertinami kiekvieno plokščiojo elemento lokalioje erdvinėje stačiakampėje koordinatinių sistemoje (Barauskas, Belevičius, Kačianauskas 2004), į kurią perskaičiuojama iš erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės.

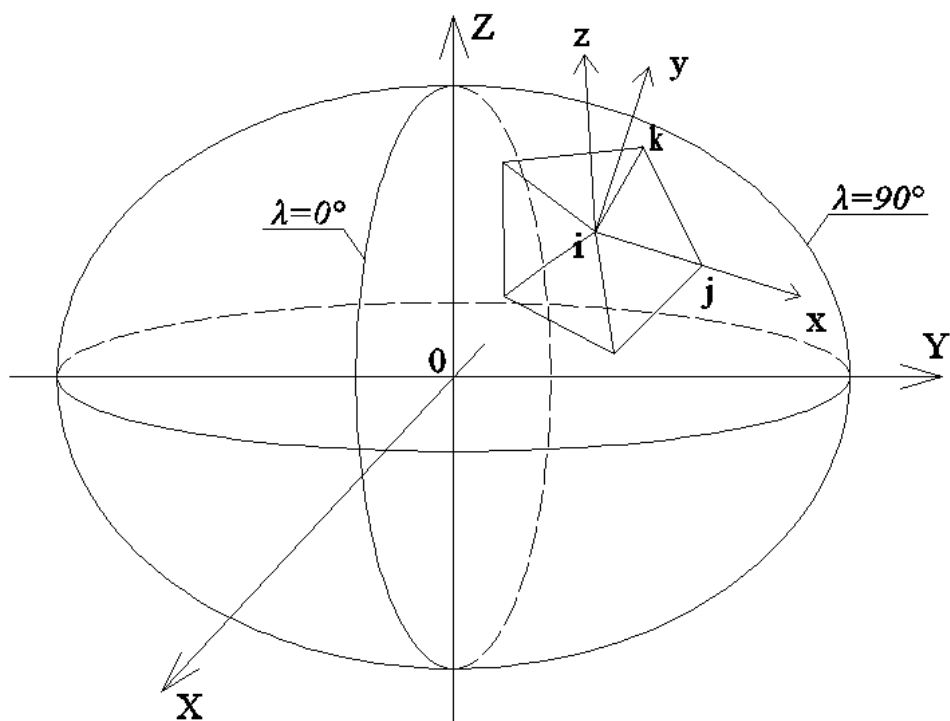
Kadangi Žemės plutos deformacijų rodikliai įvertinami kiekvieno baigtinio elemento lokalioje koordinatinių sistemoje, yra tikslinga pasirinkti tokių deformacijų ir įtempių įvertinimo būdus, kurie būtų invariantiški koordinatinių sistemoms. Tokie, invariantiški koordinatinių sistemoms metodai yra tenzorinės geodezinių matavimų analizės būdu įvertinti Žemės plutos deformacijų bei įtempių rodikliai (Cai 2004; Dermanis 1981; Vaníček 1986; Zakarevičius 2003; Stanionis 2005). Žemės plutos deformacijų rodiklių bei įtempių įvertinimo metodika išnagrinėta šio darbo 2.1 ir 2.3 poskyriuose.

2.4.2. Žemės paviršiaus aproksimavimas trikampaiais plokščiaisiais baigtiniais elementais

Tarkime, kad kreivame Žemės paviršiuje turime geodezinio tinklo punktus. Šiame darbe nagrinėjamuoju atveju – nuolat veikiančios *GPS* stotys, kurių koordinatės (X , Y , Z) yra nustatytos erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje koordinatinių sistemoje. Trikampiams sudaryti sujungiamo punktų viršūnės kertančiomis stygomis.

Tokiu būdu, gauname tiriamosios teritorijos aproksimavimo trikampės formos baigtiniais plokščiaisiais elementais modelį (2.1 pav.). Tokie trikampiai baigtiniai plokštieji elementai ir šių elementų lokaliosios erdvių koordinatinių sistemos gali būti orientuotos laisvai tuo atveju, jeigu pagal baigtinio elemento viršūnių koordinatinių pokyčius deformacijų rodikliai vertinami invariantiška koordinatinių sistemos atžvilgiu tenzorinės analizės metodika.

Tarkime, kad (2.1 pav.) pažymėto baigtinio elemento lokaliosios koordinatinių sistemos (x , y , z) koordinatinių pradžios tašką sutapatiname su trikampio baigtinio elemento viršūne i , o x –ų ašį sutapatiname su styga ij ir teigiamą kryptį nukreipiame į tašką j . Ašis y statmena x ašiai ir yra šio baigtinio elemento plokštumoje. Ašis z bus statmena baigtinio elemento plokštumai ir nukreipta į viršų.



2.1 pav. Globalioji geodezinio tinklo ir lokaloji baigtinio elemento koordinatinių sistemų

Fig. 2.1 Global geodetic network and local finite element coordinate system

Tuomet, kraštinę ij globalioje koordinatinių sistemoje galima išreikšti vektoriumi (Barauskas *et al.* 2004):

$$\{v_{ij}\} = \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix}. \quad (2.4.1)$$

Šios kraštinės kryptiniai lokalsios koordinatinių sistemos x ašies kosinusai:

$$\begin{pmatrix} C_{xX} \\ C_{xY} \\ C_{xZ} \end{pmatrix} = \frac{1}{l_{ij}} \cdot v_{ij}, \quad (2.4.2)$$

čia

$$l_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}. \quad (2.4.3)$$

Lokalsios sistemos z ašis yra statmena baigtinio elemento ijk plokštumai, z ašies kryptį galima apibūdinti vektorių vektorine sandauga:

$$\{\nu_z\} = \{\nu_{ij}\} \cdot \{\nu_{ik}\}, \quad (2.4.4)$$

arba

$$\{\nu_z\} = \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_k - X_i \\ Y_k - Y_i \\ Z_k - Z_i \end{pmatrix}. \quad (2.4.5)$$

Pažymėsime, kad:

$$X_j - X_i = X_{ji}, \quad (2.4.6)$$

$$Y_j - Y_i = Y_{ji}, \quad (2.4.7)$$

$$Z_j - Z_i = Z_{ji}, \quad (2.4.8)$$

$$X_k - X_i = X_{ki}, \quad (2.4.9)$$

$$Y_k - Y_i = Y_{ki}, \quad (2.4.10)$$

$$Z_k - Z_i = Z_{ki}. \quad (2.4.11)$$

Tuomet, atsižvelgiant į (2.4.6)–(2.4.11), lokalsios koordinačių sistemos z ašies kosinusai bus:

$$\begin{pmatrix} C_{zX} \\ C_{zY} \\ C_{zZ} \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \cdot \begin{pmatrix} Y_{ji}Z_{ik} - Z_{ji}Y_{ki} \\ Z_{ji}X_{ik} - X_{ji}Z_{ki} \\ X_{ji}Y_{ik} - Y_{ji}X_{ki} \end{pmatrix}, \quad (2.4.12)$$

čia

$$2\Delta = \sqrt{(Y_{ji}Z_{ik} - Z_{ji}Y_{ki})^2 + (Z_{ji}X_{ik} - X_{ji}Z_{ki})^2 + (X_{ji}Y_{ik} - Y_{ji}X_{ki})^2}. \quad (2.4.13)$$

Lokalsios koordinačių sistemos ašies y krypties kosinusai taip pat bus vektorinė sandauga:

$$\{\nu_y\} = \{\nu_z\} \cdot \{\nu_{ij}\} \quad (2.4.14)$$

Atlikus veiksmus, gauname:

$$\begin{pmatrix} C_{yX} \\ C_{yY} \\ C_{yZ} \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \cdot \begin{pmatrix} C_{zY}C_{zZ} - C_{zZ}C_{xY} \\ C_{zZ}C_{xX} - C_{zX}C_{zZ} \\ C_{zX}C_{xY} - C_{zY}C_{xX} \end{pmatrix}, \quad (2.4.15)$$

Globaliosios koordinačių sistemos X, Y, Z koordinatėms perskaičiuoti į lokaliąją baigtinio elemento koordinačių sistemos x, y, z , koordinates taikome formulę (Zakarevičius 1996a; Litvin and Fuentes 2004):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = C \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (2.4.16)$$

čia C – posūkio matrica, X_0, Y_0, Z_0 – lokalsios koordinačių sistemos pradžios taško koordinatės globalioje koordinačių sistemoje.

Į (2.4.16) įeinanti posūkio matrica yra (Zakarevičius 1996a; Litvin, Fuentes 2004; Belevičius *et al.* 2004):

$$C = \begin{vmatrix} C_{xX} & C_{yY} & C_{zZ} \\ C_{yX} & C_{yY} & C_{zY} \\ C_{zX} & C_{zY} & C_{zZ} \end{vmatrix}, \quad (2.4.17)$$

Koordinatėms perskaičiuoti iš lokalsios koordinačių sistemos į globaliąją koordinačių sistemą, taikoma formulė (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991; Jekeli 2004; Krakiwsky, Wells 1971):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + C^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (2.4.18)$$

Žemės plutos deformacijų rodikliai ir įtempių pokyčiai lokalyje koordinačių sistemoje įvertinami pagal geodezinių punktų pokyčius, nustatytus lokalyje koordinačių sistemoje $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodikliai bei įtempių pokyčiai įvertinami pagal visų trijų koordinačių pokyčius ΔX , ΔY , ΔZ , įvykusius per tam tikrą laiko tarpą.

Horizontaliosios deformacijos ir įtempių pokyčiai įvertinami baigtinio elemento plokštumoje pagal pokyčius Δx , Δy . Šiuo atveju, deformacijų rodikliai yra orientuoti lokaliosios koordinačių sistemos xyz atžvilgiu.

Aprašytu būdu orientuota lokaloji koordinačių sistema taip pat turi savų trūkumų, įvertinant Žemės plutos deformacijų, nustatytą pagal geodezinių matavimų duomenis, geotektoninę interpretaciją. Be to, nepatogu atvaizduoti deformacijų rodiklių sklaidos dėšningumus, kadangi kiekvieno baigtinio elemento lokaliosios koordinačių sistemos orientavimas yra skirtingas, tiesiogiai nesusietas su dienovidinio kryptimis bei normale į Žemės paviršių.

Atsižvelgiant į tai, reikalingos kitaip orientuotos lokaliosios atskirų baigtinių elementų koordinačių sistemos. Viena iš tokių lokaliųjų koordinačių sistemų gali būti horizontalinė koordinačių sistema.

Svarbiausios horizontalinės koordinačių sistemos ypatybės yra tos, kad kiekvienas lokaliosios horizontalinės koordinačių sistemos x ašies kryptis sutampa su koordinačių sistemos pradžios taško dienovidinio kryptimi ir nukreipta į šiaurinį polių, oz ašis sutampa su koordinačių pradžios taško normale ir nukreipta į zenitą.

Tai reiškia, kad tokiose lokaliuose koordinačių sistemose galima užtikrinti vieningą, susietą su sferoidine Žemės forma, Žemės plutos deformacijų rodiklių orientavimą. Taškų horizontalusis poslinkis, svarbiausiųjų horizontaliųjų deformacijų kryptys gali būti apibūdinamos azimutais, o vertikaliosios deformacijos ir jų rodikliai – nustatomi normalės kryptimi.

Visa tai sudaro sąlygas suprantamai ir aiškiai pateikti deformacijų rodiklių erdvinę sklaidą ir atlikti jų geotektoninę interpretavimą.

2.4.3. Baigtinių elementų lokaliosios horizontalinės koordinačių sistemos

Žemės plutos deformacijų rodiklių aiškesniam pateikimui Žemės paviršiaus atžvilgiu bei paprastesniam gautųjų rezultatų interpretavimui, rekomenduotina taikyti plokštiesiems trikampiems baigtiniais elementams horizontalinę koordinačių sistemą (2.4.2 poskyris).

Tam tikslui, kiekvienam baigtiniam elementui imama lokali to elemento horizontalinė koordinačių sistema, kurios pradžios taškas sutapatinamas su pasirinkta atitinkamo baigtinio elemento trikampio viršūne.

Sąsajas tarp globaliosios erdvinės stačiakampės geocentrinės ekvatorinės koordinačių sistemos ir lokaliosios baigtinio elemento horizontalinės erdvinės

stačiakampės koordinatinių sistemos galime išreikšti lygtimi (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991; Krakiwsky, Wells 1971):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (2.4.19)$$

čia X, Y, Z – globaliosios koordinatinių sistemos erdvinės stačiakampės geocentrinės ekvatorinės koordinatės, X_0, Y_0, Z_0 – lokalsios horizontinės koordinatinių sistemos pradžios taško koordinatės globalioje sistemoje, x, y, z – lokalsios sistemos horizontinės koordinatės, A – posūkio matrica.

Posūkio matrica apskaičiuojama pagal lokalsios koordinatinių sistemos koordinatinių pradžios taško geodezines koordinates: geodezinę platumą φ ir geodezinę ilgumą λ , taikant formulę (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991):

$$A = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (2.4.20)$$

Koordinatinių pradžios taško geodezinės koordinatės apskaičiuojamos iš šio taško globaliosios sistemos erdviųjų stačiakampių koordinatinių (Zakarevičius 1996a):

Geodezinė ilguma apskaičiuojama (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991):

$$\lambda_0 = \arctan \frac{Y}{X}. \quad (2.4.21)$$

Geodezinę platumą galime apskaičiuoti dviem variantais (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991):

- a) Kai turima normalinė taško projekcija elipsoido paviršiuje ($H = 0$), tuomet taško geodezinė platuma bus:

$$\cos \varphi_0 = \frac{X}{N \cos \lambda_0} = \frac{Y}{N \sin \lambda_0}, \quad (2.4.22)$$

arba

$$\sin \varphi_0 = \frac{Z}{N(1 - e^2)}, \quad (2.4.23)$$

čia

$$N = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)}}, \quad (2.4.24)$$

čia N – pirmojo vertikalo kreivumo spindulys, a – didžioji elipsoido pusašė.

Atsižvelgiant į tai, kad $N = f(\varphi_0)$, geodezinės platumos pagal (2.4.22) ir (2.4.23) apskaičiuoti negalima. Todėl padalijus (2.4.22) iš (2.4.23), eliminuojame pirmojo vertikalo kreivumo spindulį (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991) ir gauname:

$$\varphi_0 = \arctan \frac{Z \cos \lambda_0}{X \cdot (1 - e^2)} = \arctan \frac{Z \sin \lambda_0}{Y \cdot (1 - e^2)}. \quad (2.4.25)$$

- b) Kai taškas yra fiziniame Žemės paviršiuje ($H \neq 0$), geodezinė ilguma apskaičiuojama artėjimo būdu (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991), kur geodezinė platumą pirmuoju artėjimu gaunama pagal (2.4.25) formulę, o kiti geodezinės platumos artėjimai gaunami pagal formulę:

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{T_{i-1}}{R} \right), \quad (2.4.26)$$

čia

$$R = \frac{X}{\cos \lambda_0} = \frac{Y}{\sin \lambda_0}, \quad (2.4.27)$$

$$T_i = Z + N_{i-1} e^2 \sin \varphi_{i-1}. \quad (2.4.28)$$

Skaiciuojama tol, kol dviejų gretimų artėjimų rezultatų skirtumas gaunamas mažesnis už geodezinės platumos leistiną skaičiavimo paklaidą (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991).

Geodezinis aukštis apskaičiuojamas taip (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991):

$$H = \frac{X}{\cos \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0} - N = \frac{Y}{\sin \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0} - N. \quad (2.4.29)$$

Remiantis (2.4.19), lokalsiosios baigtinio elemento taškų koordinatės bus:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}. \quad (2.4.30)$$

Taikant baigtinių elementų lokaliasias horizontines koordinates, Žemės plutos deformacijų rodikliai skaičiuojami pagal šio darbo 2.1 poskyryje pateiktą metodiką.

Atkreiptinas dėmesys, kad, perskaičiuojant globaliasias koordinates į lokaliasias baigtinių elementų koordinates, mastelis nekeičiamas, todėl geodezinių taškų erdviniai pokyčiai bei Žemės plutos deformacijos bus tokios pačios abiejuose koordinačių sistemose. Skirsis tik jų orientavimas, priklausantis nuo koordinačių ašių orientavimo viena kitos atžvilgiu.

Žemės plutos deformacijoms įvertinti, taikant lokaliąją horizontalinę koordinačių sistemą, galima ir tiesiogiai pagal koordinačių pokyčius, apskaičiuotus globalioje koordinačių sistemoje.

Pažymėjus pirmojo matavimo globaliosios koordinačių sistemos koordinates X_1, Y_1, Z_1 , o antrojo – X_2, Y_2, Z_2 , jų koordinačių pokyčiai bus:

$$\Delta X = X_2 - X_1, \quad (2.4.31)$$

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1, \quad (2.4.32)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1. \quad (2.4.33)$$

Atitinkamai koordinačių pokyčiai lokaliajoje koordinačių sistemoje:

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad (2.4.34)$$

$$\Delta y = y_2 - y_1, \quad (2.4.35)$$

$$\Delta z = z_2 - z_1. \quad (2.4.36)$$

Tuomet, pagal (2.4.31)–(2.4.33) ir (2.4.34)–(2.4.36) galima parašyti:

$$\begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X_2 - X_0 \\ Y_2 - Y_0 \\ Z_2 - Z_0 \end{pmatrix} - A^T \begin{pmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{pmatrix}. \quad (2.4.37)$$

arba

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X_2 - X_0 - X_1 + X_0 \\ Y_2 - Y_0 - Y_1 + Y_0 \\ Z_2 - Z_0 - Z_1 + Z_0 \end{pmatrix}. \quad (2.4.38)$$

Iš (2.4.38) gauname, kad:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}. \quad (2.4.39)$$

Skaiciuojant horizontaliąsias deformacijas lokaliaje koordinačių sistemoje taikomos koordinatės x , y ir koordinačių pokyčiai Δx , Δy , o erdvinės deformacijos skaičiuojamos pagal x , y , z ir jų pokyčių Δx , Δy , Δz reikšmes.

Sudarant lokaliąsias trikampių baigtinių elementų horizontalių koordinačių sistemas, galimas ir kitoks lokaliųjų baigtinių elementų bei jų koordinačių sistemų orientavimas, koordinačių pradžios tašką susiejant su baigtinio trikampio elemento viršūnių vidutinėmis koordinatėmis.

Šiuo atveju baigtinio elemento lokalsios horizontalinės koordinačių sistemos pradžios taškas su vidutinėmis viršūnių koordinatėmis:

$$X_C = \frac{X_i + X_j + X_k}{3}, \quad (2.4.42)$$

$$Y_C = \frac{Y_i + Y_j + Y_k}{3}, \quad (2.4.43)$$

$$Z_C = \frac{Z_i + Z_j + Z_k}{3}. \quad (2.4.44)$$

Koordinačių pradžios taško geocentrinės koordinatės apskaičiuojamos pagal (2.4.42)–(2.4.44) formules.

Šiuo atveju baigtiniais plokščiaisiais trikampiais elementais modeliuotas daugiabriaunis paviršius yra kertantis fizinį Žemės paviršių, o pirmuoju atveju – gaubiantis.

2.4.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių bei geodinaminių įtempių pokyčių transformavimas iš globaliosios į lokaliąją koordinačių sistemą

Šiuo atveju, transformuojant koordinates iš globaliosios erdvinės stačiakampės geocentrinės ekvatorinės koordinačių sistemos į lokaliąsias erdvinės stačiakampės horizontalines koordinačių sistemas mastelis nekeičiamas.

Atsižvelgiant į tai, abiejuose koordinačių sistemose faktinės Žemės plutos deformacijos išlieka tos pačios. Skiriasi tik Žemės plutos deformacijų rodikliai

orientavimas vienoje ir kitoje koordinačių sistemose, atsižvelgiant į šių sistemų koordinačių ašis.

Remiantis tuo, Žemės plutos deformacijų analizei, taikant tenzorinės analizės būdą (2.1 ir 2.3 poskyriai), deformacijų ir įtempimų tenzorius komponentėms perskaičiuoti iš vienos sistemos į kitą, galime taikant tuos pačius transformacijos metodus (Zakarevičius 1996a; Машимов 1991; Krakiwsky, Wells 1971). Deformacijų tenzorius elementai lokaliuose sistemose bus:

$$\begin{pmatrix} e'_{xx} & e'_{xy} & e'_{xz} \\ e'_{yx} & e'_{yy} & e'_{yz} \\ e'_{zx} & e'_{zy} & e'_{zz} \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{pmatrix} A, \quad (2.4.45)$$

o įtempimų tenzorius:

$$\begin{pmatrix} \sigma'_{xx} & \sigma'_{xy} & \sigma'_{xz} \\ \sigma'_{yx} & \sigma'_{yy} & \sigma'_{yz} \\ \sigma'_{zx} & \sigma'_{zy} & \sigma'_{zz} \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} A, \quad (2.4.46)$$

Posūkio matrica apskaičiuojama iš (2.4.20) formulės.

Taikant apskaičiuotą globalioje sistemoje deformacijų bei įtempimų tenzorių tiesioginį transformavimą į lokaliasias horizontines koordinačių sistemas išvengiama tarpinių skaičiavimų susijusių su koordinačių perskaičiavimu.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Žemės plutos deformacijų rodiklių nustatymui taikoma invariantiška koordinačių sistemoms atžvilgiu tenzorinės analizės metodika, o deformacijų tenzorius elementai ir deformacijų rodikliai įvertinami taikant baigtinių elementų metodą.
2. Žemės plutos deformacijų rodikliams įvertinti baigtinių elementų metodo taikymo privalumas yra ne tik tai, kad deformacijų įverčiai yra invariantiški koordinačių sistemų poslinkiams tarp atskirų matavimų ciklų, bet ir labai svarbus privalumas yra tai, kad deformacijų rodiklių įverčių paklaidos nepriklauso nuo koordinačių absoliučių paklaidų reikšmių atžvilgiu pradinių taškų, t. y. būna tik baigtinio elemento viršūnių koordinačių skirtumų paklaidos.
3. Atsižvelgiant į tai, kad deformacijų tenzorius elementai yra kelių kintamųjų funkcijos, o deformacijų rodikliai yra deformacijų tenzorius elementų funkcijos, Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo

- įvertinimui siūloma taikyti kelių kintamųjų funkcijų tikslumo įvertinimo metodiką.
4. Remiantis determinantų skleidimu adjunktų ir algebrinių papildymų sandaugų suma bei kelių kintamųjų funkcijos tikslumo įvertinimo principais, gautos originalios formulės Žemės plutos deformacijų tenzorius elementų bei svarbiausiųjų deformacijų rodiklių tikslumui įvertinti.
 5. Pasiūlytas Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimo metodas, atsižvelgiant į Žemės formos sferoidiškumą, paremtas kevalinių konstrukcijų modeliavimo plokščiaisiais baigtiniais elementais metodika. Žemės paviršius aproksimuojamas baigtiniais trikampaiais plokščiaisiais elementais, kurių viršūnių koordinatės nustatomos kiekvieno baigtinio elemento lokaloje koordinatės sistemoje.
 6. Įvertinti tenzorius elementų ir svarbiausiųjų deformacijų rodiklių artimesniam susiejimui su horizontaliomis ir vertikalėmis Žemės plutos deformacijomis bei tikslesniam gautųjų tyrimo rezultatų geotektoniniam interpretavimui, rekomenduota taikyti plokšties trikampiems baigtiniams elementams lokalias horizontines koordinatės sistemas.
 7. Parengta metodika *GPS* matavimais nustatytų bendrosios Žemės koordinatės sistemos erdvių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinatės bei koordinatės pokyčių redukavimui į lokalias baigtinių elementų horizontines koordinatės sistemas.
 8. Taikant Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčių nustatymo metodiką, galime įvertinti geodinaminių įtempių pokyčius laikotarpyje tarp kartotinių geodezinių matavimų. Gautieji geodinaminių įtempių pokyčių rezultatai bus išreikšti ne santykiniais dydžiais, o mato vienetais, t. y. jėgos vienetais tenkančiais ploto vienetais.
 9. Pateikta metodika Žemės plutos deformacijų bei įtempių tenzorių elementų, nustatytų taikant *GPS* matavimų rezultatus bendrojoje Žemės erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje geocentrinėje koordinatės sistemoje, perskaičiavimui į lokalias baigtinių elementų horizontines koordinatės sistemas.
 10. Taikant pasiūlytą metodiką, deformacijų ir įtempių tenzorių perskaičiavimui, galima apskaičiuotus erdvių deformacijų rodiklius, nustatytų bendrojoje Žemės erdvių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinatės sistemoje, susieti su sferiniu Žemės paviršiaus horizontaliosiomis ir vertikaliosiomis deformacijomis.

Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo Baltijos regione rezultatai

Siekiant aprobuoti antrajame skyriuje rekomenduotą patobulintą metodiką ir pagrįsti jos taikymo ypatumus, atlikti dabartinių Žemės plutos judesių tyrimai Baltijos regione.

Skyriaus tematika atlikti tyrimai paskelbti autoriaus straipsniuose bei konferencijų medžiagoje (Levinskaitė 2009, 2010, 2012; Zakarevičius *et al.* 2009, 2010, 2012).

3.1. Tyrimų objektas ir pradiniai duomenys

Žemės plutos deformacijų tyrimams Baltijos regiono teritorijoje, atsižvelgiant į pastovių *GPS* tinklo stočių nagrinėjamajame regione išsidėstymą bei skelbiamus (EUREF... 2012) matavimų duomenis (1 skyrius, A priedas), panaudoti dvylikos nuolat veikiančių *EUREF GPS* tinklo (1.6 pav.) stočių BOR1, LAMA (Lenkijoje), HELG, POTS, SASS (Vokietijoje), MAR6, VIS0 (Švedijoje), METS (Suomijoje), OSLS (Norvegijoje), RIGA (Latvijoje), SULD (Danijoje) ir VLNS (Lietuvoje), 1252, 1304, 1357, 1409, 1461, 1513, 1565, 1617, 1662 *GPS* savaičių sprendiniai.

Pagal turimus *EUREF GPS* tinklo punktų stebėjimų duomenis nustatyta, kad šio tinklo erdvinių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių X koordinatų standartinis nuokrypis yra 2–3 mm, Y koordinatų neviršija 2 mm, o Z koordinatų yra 3–4 mm.

Šių punktų kiekvienų metų erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės pateiktos B priede.

3.1.1. Nuolat veikiančių GPS stočių koordinatų pokyčių analizė

Prieš atliekant dabartinių Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimą Baltijos regione, tikslinga išsianalizuoti turimus pradinis duomenis, t. y. *EUREF GPS* tinklo punktų koordinatas ir jų pokyčius laikui einant.

Nustatyti *EUREF GPS* tinklo punktų erdvinių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinatų erdvinės padėties metiniai pokyčiai laikotarpyje tarp 2004 m. ir 2012 m. (3.1–3.3 lentelės).

3.1 lentelė. X koordinatų metiniai poslinkiai (2004–2012 m.)

Table 3.1. Annual displacements of X coordinates (2004–2012)

Punkto pavadinimas	ΔX , mm/per metus							
	2005 m. – 2004 m.	2006 m. – 2005 m.	2007 m. – 2006 m.	2008 m. – 2007 m.	2009 m. – 2008 m.	2010 m. – 2009 m.	2011 m. – 2010 m.	2012 m. – 2011 m.
BOR1	–18	–9	–31	–16	–20	–18	–14	–20
HELG	–26	–4	–25	–10	–14	–14	–16	–18
LAMA	–19	–	–	–12	–18	–18	–14	–23
MAR6	–10	–15	–29	–8	–13	–19	–5	–19
METS	–11	–18	–33	–15	–14	–21	–31	–1
OSLS	–17	–15	–25	–7	–22	–14	–9	–9
POTS	–10	–16	–22	–16	–15	–27	–13	–15
RIGA	–15	–25	–25	–18	–16	–20	–23	–14
SASS	–13	–13	–20	–13	–18	–19	–13	–23
SULD	–17	–10	–27	–11	–13	–14	–12	–19
VIS0	–14	–16	–30	–11	–16	–15	–14	–22

3.2 lentelė. *Y* koordinačių metiniai poslinkiai (2004–2012 m.)**Table 3.2.** Annual displacements of *Y* coordinates (2004–2012)

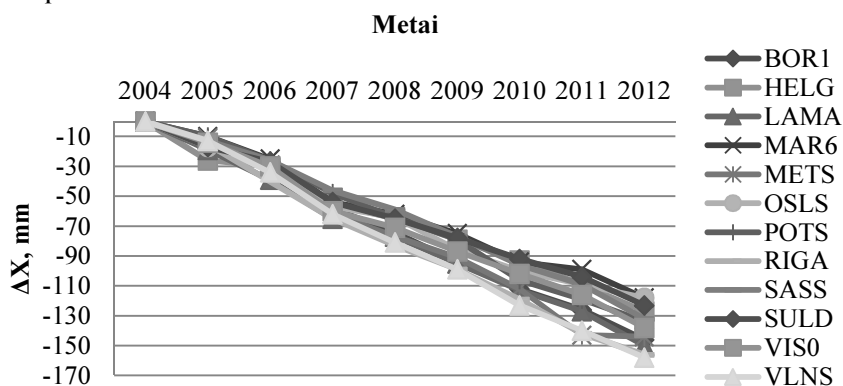
Punkto pavadinimas	ΔY , mm/per metus							
	2005 m. – 2004 m.	2006 m. – 2005 m.	2007 m. – 2006 m.	2008 m. – 2007 m.	2009 m. – 2008 m.	2010 m. – 2009 m.	2011 m. – 2010 m.	2012 m. – 2011 m.
BOR1	17	17	14	16	12	15	16	17
HELG	14	18	12	16	15	17	15	18
LAMA	15	–	–	15	14	15	16	13
MAR6	17	12	12	14	12	19	16	11
METS	16	12	15	15	14	14	1	31
OSLS	16	14	12	13	9	14	15	16
POTS	17	15	16	15	11	16	17	19
RIGA	15	18	9	13	13	14	9	18
SASS	17	13	17	15	15	14	16	18
SULD	15	20	10	15	15	18	12	17
VIS0	17	13	14	15	15	14	14	15

3.3 lentelė. *Z* koordinačių metiniai poslinkiai (2004–2012 m.)**Table 3.3.** Annual displacements of *Z* coordinates (2004–2012)

Punkto pavadinimas	ΔZ , mm/per metus							
	2005 m. – 2004 m.	2006 m. – 2005 m.	2007 m. – 2006 m.	2008 m. – 2007 m.	2009 m. – 2008 m.	2010 m. – 2009 m.	2011 m. – 2010 m.	2012 m. – 2011 m.
BOR1	6	15	14	9	6	3	15	8
HELG	–8	21	20	15	13	10	10	6
LAMA	6	–	–	20	10	7	7	12
MAR6	19	8	17	17	15	4	37	–6
METS	13	6	16	12	12	2	–7	3
OSLS	1	9	17	19	2	9	20	19
POTS	13	5	22	7	14	–6	14	18
RIGA	12	1	20	6	11	4	4	16
SASS	11	7	30	11	6	5	11	2
SULD	1	13	16	12	10	5	14	6
VIS0	11	7	14	14	10	11	12	1

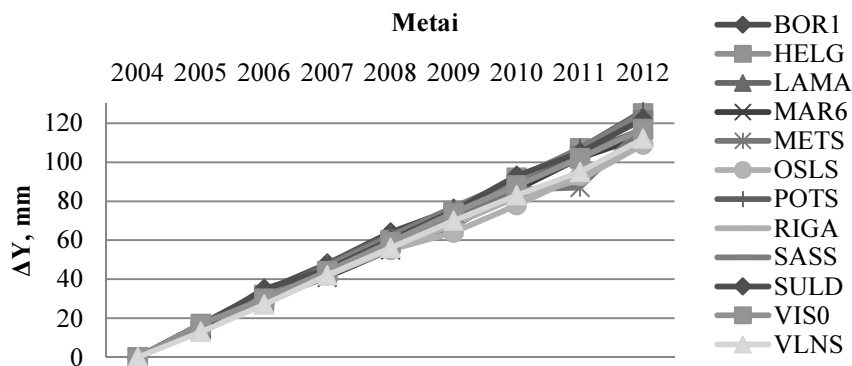
Iš pateiktų skaičiavimo rezultatų (3.1–3.3 lentelės) matyti, kad *EUREF GPS* tinklo punktų erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės X koordinatės erdvinės padėties pokyčių reikšmės yra neigiamo ženklo, Y koordinatės – teigiamo ženklo, Z koordinatės erdvinės padėties pokyčių reikšmės taip pat yra teigiamo ženklo, išskyrus 2005–2004 metais punkto HELG, 2006–2005 metais punkto VLNS, 2010–2009 metais punkto POTS, 2011–2010 metais punkto METS bei 2012–2011 metais punkto MAR6. Didžiausi punktų X ir Z koordinačių pokyčiai yra tarp 2007 m. ir 2006 m., punktų Y koordinačių tarp 2012 m. ir 2011 m.

EUREF GPS tinklo punktų koordinačių suminė poslinkių kaita pateikta 3.1–3.3 paveiksluose.



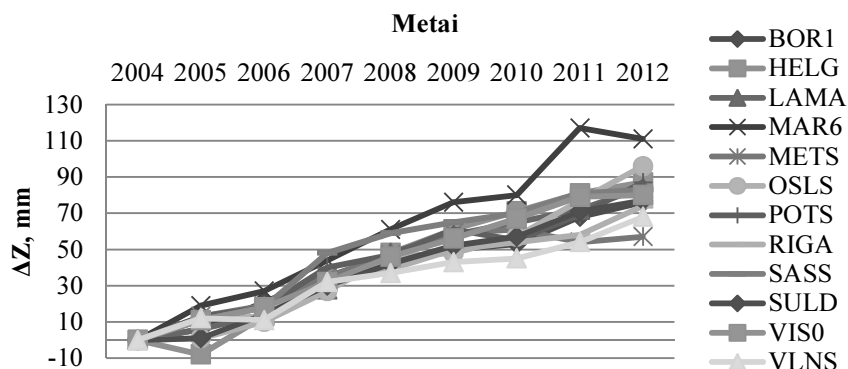
3.1 pav. X koordinačių poslinkiai (2004–2012 m.)

Fig. 3.1. The displacements of X coordinates



3.2 pav. Y koordinačių poslinkiai (2004–2012 m.)

Fig. 3.2. The displacements of Y coordinates



3.3 pav. Z koordinačių poslinkiai (2004–2012 m.)

Fig. 3.3 The displacements of Z coordinates

Punktų koordinačių suminių pokyčių grafikuose (3.1–3.3 pav.) matyti, kad koordinačių skirtumas tarp tų pačių punktų kiekvienais metais didėja: X koordinatės yra neigiamai didėjantis, Y ir Z – teigiamai. *EUREF GPS* tinklo punktų koordinatės kinta tiesiškai. Itin išsiskiria *GPS* tinklo punktų METS ir MAR6 koordinačių pokyčiai 2011 m.

EUREF GPS tinklo punktų koordinačių suminiai poslinkiai, įvykę per visus 8 metus, pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Koordinačių X, Y, Z poslinkiai per 8 metus (2004–2012 m.)

Table 3.4. Total displacements of X, Y, Z coordinates in 8 years (2004–2012)

Punkto pavadinimas	$\Delta X_{met}, mm$	$\Delta Y_{met}, mm$	$\Delta Z_{met}, mm$	Punkto pavadinimas	$\Delta X_{met}, mm$	$\Delta Y_{met}, mm$	$\Delta Z_{met}, mm$
BOR1	-146	124	76	POTS	-134	126	87
HELG	-127	125	87	RIGA	-156	109	74
LAMA	-150	117	84	SASS	-132	125	83
MAR6	-118	113	111	SULD	-123	122	77
METS	-144	118	57	VIS0	-138	117	80
OSLS	-118	109	96	VLNS	-158	112	68

Vidutiniškai per metus *EUREF GPS* tinklo punktų X, Y, Z koordinačių kitimo rezultatai pateikti 3.5 lentelėje. Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, jog laikotarpyje tarp 2004 m. ir 2012 m. *GPS* tinklo punktų koordinačių X ir Y pokyčiai yra virš 100 mm, Z – apie 70–80 mm. Vidutiniškai per metus šių punktų koordinatės kinta taip: X – koordinatės apie 17–18 mm/per metus, Y koordinatės – 14–15 mm/per metus, Z koordinatės – 9–10 mm/per metus.

3.5 lentelė. Vidutiniai metiniai koordinačių X , Y , Z poslinkiai (2004–2012 m.)**Table 3.5.** Average annual displacements of X , Y , Z coordinates (2004–2012)

Punkto pavadinimas	Koordinačių pokyčiai, mm/per metus			Punkto pavadinimas	Koordinačių pokyčiai, mm/per metus		
	$\Delta X_{vid.}$	$\Delta Y_{vid.}$	$\Delta Z_{vid.}$		$\Delta X_{vid.}$	$\Delta Y_{vid.}$	$\Delta Z_{vid.}$
BOR1	–18	16	10	POTS	–17	16	11
HELG	–16	16	11	RIGA	–20	14	9
LAMA	–13	11	8	SASS	–17	16	10
MAR6	–15	14	14	SULD	–15	15	10
METS	–18	15	7	VISO	–17	15	10
OSLS	–15	14	12	VLNS	–20	14	9

Lietuvoje, tarptautinio Vilniaus oro uosto teritorijoje įrengtos *GPS* stoties VLNS, kuri yra dalis *EUREF* nuolat veikiančių stočių tinklo dalis, reguliarius nuolatiniai stebėjimai pradėti nuo 1996 m. (Paršeliūnas *et al.* 2011; Paršeliūnas, Kolosovskis 2005, 2011).

Naujausiais tyrimais nustatyta (Paršeliūnas, Kolosovskis 2011), kad punkto VLNS ETRS89 geocentrinių koordinačių metiniai pokyčių greičiai yra:

$$v_X = -20,0 \text{ mm/per metus,}$$

$$v_Y = 13,6 \text{ mm/per metus,}$$

$$v_Z = 8,0 \text{ mm/per metus.}$$

Šiame darbe nustatytus vidutinius metinius, nuolat veikiančių *GPS* stočių, koordinačių poslinkius laikotarpyje nuo 2004 m. iki 2012 m. nustatyta, kad stoties VLNS erdvinės stačiakampės ekvatorinės koordinatės kinta:

$$\Delta X_{vid.} = -20,0 \text{ mm/per metus,}$$

$$\Delta Y_{vid.} = 14,0 \text{ mm/per metus,}$$

$$\Delta Z_{vid.} = 9,0 \text{ mm/per metus.}$$

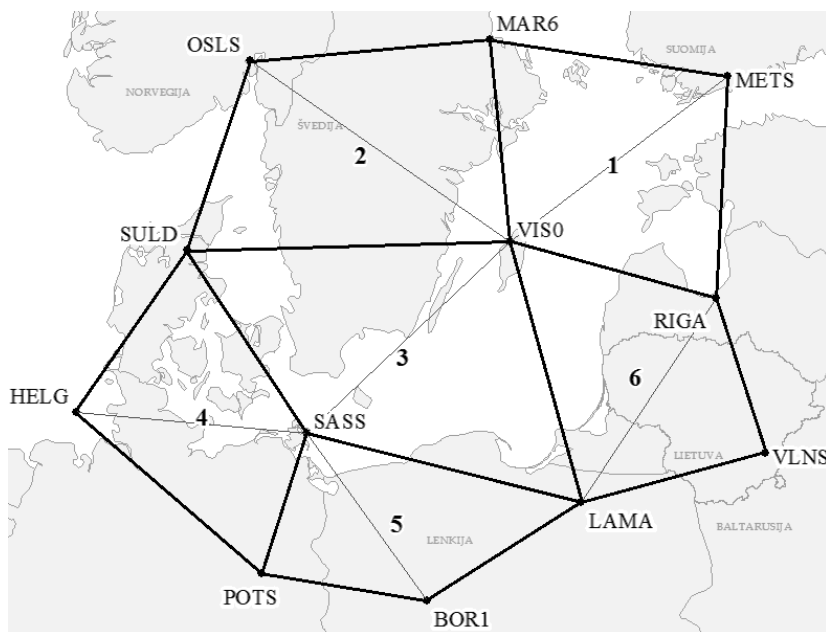
Kitų stočių vidutinių metinių koordinačių poslinkių reikšmės (3.5 lentelė) artimos nustatytiems stoties VLNS vidutiniams metiniams poslinkiams. Iš atliktų tyrimų rezultatų matyti, kad vidutiniai metiniai *EUREF GPS* tinklo punktų koordinačių poslinkiai yra apie 3–7 kartus didesni už jų vidutines kvadratinės paklaidas.

Gauti rezultatai neprieštarauja su kitų mokslininkų atliktiems tyrimams ir rodo, kad Baltijos regione vyksta Žemės plutos judesiai. Atsižvelgiant į tai, dabartinių Žemės plutos deformacijų ir įtempių nustatymui Baltijos regione panaudosime aukščiau aprašytą *EUREF GPS* tinklo punktų matavimų duomenis.

3.1.2. Žemės paviršiaus modeliavimas plokščiaisiais baigtiniais elementais ir lokaliųjų koordinatų skaičiavimas

Sferoidinio Žemės paviršiaus modeliavimo baigtiniais elementais principas yra geodezinių tinklų punktų viršūnių sujungimas kertančiomis stygomis. Nagrinėjamu atveju, aproksimavimo baigtiniais elementais modeliui sudaryti naudosime nuolat veikiančių *EUREF GPS* tinklo punktus (3.1 skyrius).

Atsižvelgiant į aukščiau minėtų punktų išsidėstymą, erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių nustatymui nagrinėjamo Baltijos regiono Žemės paviršius aproksimuojamas 6 erdviniais baigtiniais elementais – tetraedrais. Tetraedro viršūnės yra keturiuose greta esančiuose pastovių *GPS* stočių punktuose. Sudaryta erdvinių baigtinių elementų tinklo schema pavaizduota 3.4 paveiksle.

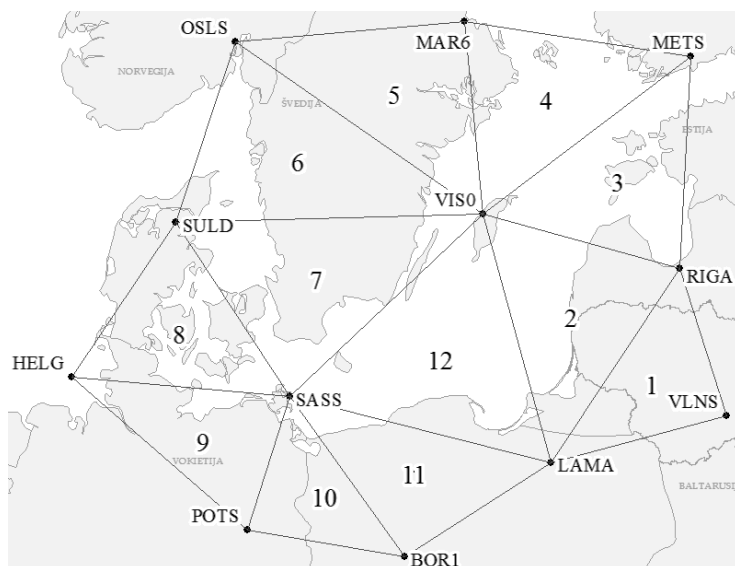


3.4 pav. Baigtinių erdvinių elementų (tetraedrų) tinklo schema

Fig. 3.4. The scheme of spatial finite element's (tetrahedron's) network

Siekiant aprobuoti antrajame skyriuje pateiktą patobulintą horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų įvertinimo metodiką (2.4 poskyris), sferoidinis Žemės paviršius modeliuojamas plokščiuoju trikampių baigtiniu elementu, kurio viršūnės sutapatinamos su nuolat veikiančiomis *GPS* stotimis. Šiuo atveju, sujungiant punktų viršūnes kertančiomis stygomis, gaunamas tiriamosios

teritorijos aproksimavimo trikampės formos baigtiniais plokščiaisiais elementais modelis pateiktas 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Baigtinių elementų (trikampių) tinklo schema (1)
Fig. 3.5. The scheme of finite element's (triangle's) network (1)

Remiantis 2.4 poskyryje patobulinta Žemės plutos deformacijų nustatymo, įvertinant Žemės formos sferoidiškumą, metodiką, punktų erdvinės stačiakampės ekvatorines geocentrines koordinates perskaičiuojame į Žemės paviršių aproksimuojančių baigtinių elementų lokalias koordinačių sistemas. Baigtinių elementų lokaliųjų horizontinių koordinačių sistemų koordinates nustatysime dviem variantais:

- apskaičiuojant kiekvieno baigtinio elemento viršūnių koordinatės jo lokaloje horizontinėje koordinačių sistemoje;
- apskaičiuojant kiekvieno baigtinio elemento viršūnių koordinates vieningoje tiriamajame regione lokaloje horizontinėje koordinačių sistemoje.

Pirmuoju atveju, kiekvieno baigtinio elemento lokalsios horizontinės koordinačių sistemos pradžios taškas sutapatinamas su pasirinkta atitinkamo baigtinio elemento trikampio viršūne (2.4.2 ir 2.4.3 poskyriai).

Toliau, pagal žinomas horizontinės koordinačių sistemos pradžios taško geodezines koordinates, apskaičiuojami kiekvieno baigtinio horizontinės sistemos orientavimo elementai (2.4.20 formulė), reikalingi koordinatėms perskaičiuoti:

$$A_{\text{LAMA}} = \begin{vmatrix} -0,2080148253 & -0,8079116085 & 0,5513698080 \\ -0,2851799446 & 0,5893036847 & 0,7559057920 \\ 0,9356293239 & 0 & 0,3529840908 \end{vmatrix}. \quad (3.1.1)$$

$$A_{\text{RIGA}} = \begin{vmatrix} -0,2223415243 & -0,8381817410 & 0,4980116621 \\ -0,3417045711 & 0,5453910239 & 0,7653669820 \\ 0,9131277198 & 0 & 0,4076736030 \end{vmatrix}. \quad (3.1.2)$$

$$A_{\text{SASS}} = \begin{vmatrix} -0,1369287546 & -0,8142531650 & 0,5641296832 \\ -0,1920633315 & 0,5805099339 & 0,7912773808 \\ 0,9490559746 & 0 & 0,2358766778 \end{vmatrix}. \quad (3.1.3)$$

$$A_{\text{VISO}} = \begin{vmatrix} -0,1685928795 & -0,8448312583 & 0,5077761179 \\ -0,2662126932 & 0,5350328447 & 0,8017921553 \\ 0,9490559746 & 0 & 0,3151075325 \end{vmatrix}. \quad (3.1.4)$$

Antruoju atveju, kiekvieno baigtinio elemento viršūnių koordinatės nustatomos bendroje lokaliajoje horizontalinėje koordinatinių sistemoje norint išnagrinėti, kaip įtakoja į deformacijų rodiklių įvertinimą lokaliosios horizontalinės koordinatinių sistemos pradžios taško padėtis (koordinatinių pradžios taško nuotolis iki tolimiausiai esančių tiriamojo objekto punktų).

Žemės plutos deformacijų tyrimams naudotų erdvinių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinatinių reikšmės pateiktos B priede.

Perskaičiuotos vieningoje tiriamojo regiono horizontalinėje koordinatinių sistemoje koordinatės ir standartiniai nuokrypiai pateikti C priede.

3.2. Erdvinių Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo rezultatai

Taikant (2.1.1 poskyris) pateiktą metodiką, erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzorius elementams įvertinti naudosime *EUREF GPS* tinklo punktų (3.1 skyrius) koordinatinių pokyčius, nustatytus erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje koordinatinių sistemoje ir perskaičiuotoje horizontalinėje topocentrinėje koordinatinių sistemoje.

Apskaičiuoti punktų koordinatinių pokyčiai per 8 metus erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje geocentrinėje koordinatinių sistemoje pateikti

3.6 lentelėje, o vieningoje lokaliajoje horizontalinėje koordinačių sistemoje (pagal C priede pateiktas koordinates), kurios pradžia yra punktas VIS0 – 3.7 lentelėje. Sudarytas erdviųjų baigtinių (tetraedrų) elementų tinklas pateiktas 3.4 paveiksle.

3.6 lentelė. Erdviųjų stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinačių pokyčiai

Table 3.6. Changes of spatial rectangular equatorial geocentric coordinates

Punktas	Koordinačių pokyčiai, m			Punktas	Koordinačių pokyčiai, m		
	ΔX	ΔY	ΔZ		ΔX	ΔY	ΔZ
BOR1	-0,1475	0,1238	0,0752	POTS	-0,1334	0,1253	0,0879
HELG	-0,1272	0,1242	0,0865	RIGA	-0,1567	0,1094	0,0712
LAMA	-0,1502	0,1168	0,0845	SASS	-0,1318	0,1245	0,0841
MAR6	-0,1188	0,1142	0,1106	SULD	-0,1241	0,1220	0,0778
METS	-0,1455	0,1161	0,0558	VIS0	-0,1375	0,1167	0,0794
OSLS	-0,1180	0,1084	0,0971	VLNS	-0,1582	0,1115	0,0687

3.7 lentelė. Lokaliųjų horizontalinių koordinačių pokyčiai

Table 3.7. Changes of local horizontal coordinates

Punktas	Koordinačių pokyčiai, m			Punktas	Koordinačių pokyčiai, m		
	Δx	Δy	Δz		Δx	Δy	Δz
BOR1	0,0633	0,1908	0,0481	POTS	0,0726	0,1797	0,0605
HELG	0,0705	0,1739	0,0622	RIGA	0,0648	0,1909	0,0306
LAMA	0,0744	0,1894	0,0440	SASS	0,0689	0,1779	0,0594
MAR6	0,0946	0,1615	0,0661	SULD	0,0622	0,1701	0,0594
METS	0,0466	0,1851	0,0368	VIS0	0,0675	0,1786	0,0488
OSLS	0,0832	0,1577	0,0576	VLNS	0,0622	0,1933	0,0308

Erdviųjų Žemės plutos deformacijų tenzorius (2.1.1 formulė) komponentės įvertinsime taip:

- pagal apskaičiuotus koordinačių pokyčius, nustatytus bendrojoje Žemės erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje geocentrinėje koordinačių sistemoje (toliau – 1 variantas);
- pagal 2.2.45 formulę transformuojant erdvinius Žemės plutos deformacijų rodiklius, nustatytus pagal koordinačių pokyčius erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje koordinačių sistemoje (toliau – 2 variantas);
- pagal koordinačių pokyčius, nustatytus lokaliajoje horizontalinėje koordinačių sistemoje (2.4.3 poskyris) (toliau – 3 variantas).

Taikant paskutinius du variantus, erdviųjų Žemės plutos deformacijų tenzorius komponentės įvertinamos atsižvelgiant į Žemės formos sferiškumą.

Pagal erdvinių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinatų pokyčius (3.7 lentelė) nustatytos erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzoriaus komponentių reikšmės (1 variantas) pateiktos 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzoriaus komponentės (1 variantas)

Table 3.8. Components of spatial deformations tensor (1st variant)

Tenzoriaus komponentės	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
$e_{xx} \cdot 10^{-6}$	-0,619	-1,161	0,192	-0,200	-0,404	-0,854
$e_{yy} \cdot 10^{-6}$	0,355	-3,595	0,037	0,023	-0,233	-0,132
$e_{zz} \cdot 10^{-6}$	-7,688	-3,704	0,161	0,415	-2,041	1,070
$e_{xy} \cdot 10^{-6}$	-0,300	-0,316	0,021	-0,052	-0,162	-0,380
$e_{xz} \cdot 10^{-6}$	-1,064	-1,879	0,303	-0,266	-0,552	-1,361
$e_{yx} \cdot 10^{-6}$	0,931	-1,452	0,178	0,115	0,826	-0,284
$e_{yz} \cdot 10^{-6}$	1,669	-2,473	0,250	0,154	1,141	-0,476
$e_{zx} \cdot 10^{-6}$	-4,295	-2,316	0,121	0,320	-1,448	0,709
$e_{zy} \cdot 10^{-6}$	-1,756	-0,594	0,161	0,056	-0,441	0,238

Kaip matyti pateiktoje 3.8 lentelėje, erdvinio baigtinio elemento (tetraedro) Nr. 3 visos deformacijų tenzoriaus komponentių reikšmės yra teigiamo ženklo, o erdvinio baigtinio elemento (tetraedro) Nr. 2 – neigiamo ženklo.

Erdvinės santykinės linijinės deformacijos e_{xx} kinta nuo $-1,161 \cdot 10^{-6}$ iki $0,192 \cdot 10^{-6}$, e_{yy} kitimo ribos yra nuo $-3,595 \cdot 10^{-6}$ iki $0,355 \cdot 10^{-6}$, o e_{zz} kinta nuo $-7,688 \cdot 10^{-6}$ iki $1,070 \cdot 10^{-6}$ (3.8 lentelė). Erdvinės santykinės šlyties deformacijos e_{xy} kinta nuo $-0,380 \cdot 10^{-6}$ iki $0,021 \cdot 10^{-6}$, e_{xz} kitimo ribos yra nuo $-1,879 \cdot 10^{-6}$ iki $0,303 \cdot 10^{-6}$, e_{yx} kinta nuo $-1,452 \cdot 10^{-6}$ iki $0,931 \cdot 10^{-6}$, e_{yz} kinta nuo $-2,473 \cdot 10^{-6}$ iki $1,669 \cdot 10^{-6}$, e_{zx} kinta nuo $-4,295 \cdot 10^{-6}$ iki $0,709 \cdot 10^{-6}$, e_{zy} kitimo ribos yra nuo $-1,756 \cdot 10^{-6}$ iki $0,238 \cdot 10^{-6}$ (3.8 lentelė).

Nustatant erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzoriaus komponentes pagal 2 ir 3 variantus, nustatytos tenzoriaus komponentių reikšmės yra identiškos. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzorius komponentės (2 ir 3 variantai)
Table 3.9. Components of spatial deformations tensor (2nd and 3rd variants)

Tenzoriaus komponentės	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
$e_{xx} \cdot 10^{-6}$	-5,993	-0,987	0,027	0,317	-1,528	1,047
$e_{yy} \cdot 10^{-6}$	-0,627	-0,131	0,062	0,317	-0,348	-0,348
$e_{zz} \cdot 10^{-6}$	-1,315	-2,754	0,308	0,073	-0,476	-0,649
$e_{xy} \cdot 10^{-6}$	2,643	0,592	-0,021	-0,233	0,963	-0,571
$e_{xz} \cdot 10^{-6}$	-5,882	-0,979	-0,052	0,331	-1,668	1,126
$e_{yx} \cdot 10^{-6}$	1,415	0,195	-0,113	0,225	0,548	0,687
$e_{yz} \cdot 10^{-6}$	1,443	0,245	-0,079	0,246	0,644	0,772
$e_{zx} \cdot 10^{-6}$	-1,271	-2,975	0,321	0,075	0,400	-0,579
$e_{zy} \cdot 10^{-6}$	5,514	1,583	-0,206	-0,059	0,237	0,258

Iš 3.9 lentelėje pateiktų tyrimo rezultatų nustatyta, kad erdvinės santykinės linijinės deformacijos e_{xx} kinta nuo $-5,993 \cdot 10^{-6}$ iki $1,047 \cdot 10^{-6}$, e_{yy} kitimo ribos yra nuo $-0,627 \cdot 10^{-6}$ iki $0,317 \cdot 10^{-6}$, o e_{zz} kinta nuo $-2,754 \cdot 10^{-6}$ iki $0,308 \cdot 10^{-6}$.

Erdvinės santykinės šlyties deformacijos e_{xy} kinta nuo $-0,571 \cdot 10^{-6}$ iki $2,643 \cdot 10^{-6}$, e_{xz} kitimo ribos yra nuo $-5,882 \cdot 10^{-6}$ iki $1,126 \cdot 10^{-6}$, e_{yx} kinta nuo $-0,113 \cdot 10^{-6}$ iki $1,415 \cdot 10^{-6}$, e_{yz} kinta nuo $-0,079 \cdot 10^{-6}$ iki $1,443 \cdot 10^{-6}$, e_{zx} kinta nuo $-2,975 \cdot 10^{-6}$ iki $0,400 \cdot 10^{-6}$, e_{zy} kinta nuo $-0,206 \cdot 10^{-6}$ iki $5,514 \cdot 10^{-6}$ (3.9 lentelė).

Erdvinius Žemės plutos geodinaminis įtempius įvertinsime taip pat pagal kelis variantus:

- pagal įvertintas erdvinių deformacijų tenzorius komponentes, kurios nustatytos bendrojoje Žemės erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje geocentrinėje koordinačių sistemoje (toliau – 1 variantas);
- pagal 2.2.46 formulę transformuojant erdvinius Žemės plutos įtempių pokyčius, nustatytus pagal erdvinių deformacijų tenzorius komponentes erdvinėje stačiakampėje ekvatorinėje koordinačių sistemoje (toliau – 2 variantas);
- pagal erdvinių deformacijų tenzorius komponentes, nustatytas lokaliajoje horizontinėje koordinačių sistemoje (2.4.3 poskyris) (toliau – 3 variantas).

Taikant (2.3.6)–(2.3.15) formules (2.3.1 poskyris) apskaičiuoti erdviniai normalinių bei tangentinių įtempių pokyčiai. Analogiškai kaip ir erdvinių Žemės plutos deformacijų atveju, taikant 2.4.46 formulę, perskaičiuoti geodinaminis

įtėmpių pokyčių reikšmės (2 variantas) identiškos geodinaminių įtėmpių pokyčių reikšmėms, nustatytoms lokaliroje horizontalinėje koordinačių sistemoje (3 variantas). Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.10 (1 variantas) ir 3.11 (2 ir 3 variantai) lentelėse.

3.10 lentelė. Erdviniai geodinaminių įtėmpių pokyčiai (1 variantas)

Table 3.10. Spatial changes of geodynamic stresses (1st variant)

Įtėmpiai	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
σ_{xx} , MPa	-0,429	-0,503	0,036	-0,008	-0,163	-0,076
σ_{yy} , MPa	-0,338	-0,730	0,022	0,013	-0,147	-0,008
σ_{zz} , MPa	-1,090	-0,741	0,033	0,050	-0,315	0,104
σ_{xy} , MPa	-0,014	-0,015	0,001	-0,002	-0,008	-0,018
σ_{xz} , MPa	-0,050	-0,088	0,014	-0,012	-0,026	-0,064
σ_{yz} , MPa	-0,064	-0,115	0,012	0,007	0,053	-0,022

3.11 lentelė. Erdviniai geodinaminių įtėmpių pokyčiai (2 ir 3 variantai)

Table 3.11. Spatial changes of geodynamic stresses (2nd and 3rd variants)

Įtėmpiai	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
σ_{xx} , MPa	-0,930	-0,273	0,021	0,041	-0,252	0,100
σ_{yy} , MPa	-0,429	-0,193	0,024	-0,004	-0,142	-0,030
σ_{zz} , MPa	-0,493	-0,438	0,047	0,018	-0,154	-0,058
σ_{xy} , MPa	0,123	0,028	-0,001	-0,011	0,045	-0,027
σ_{xz} , MPa	-0,274	-0,046	-0,002	0,015	-0,078	0,053
σ_{yz} , MPa	0,067	0,011	-0,004	0,012	0,030	0,036

Iš 3.10 lentelėje pateiktų tyrimo rezultatų nustatyta, kad erdviniai normaliniai geodinaminiai įtėmpiai σ_{xx} kinta nuo -0,503 MPa iki 0,036 MPa, σ_{yy} kitimo ribos yra nuo -0,730 MPa iki 0,022 MPa, o σ_{zz} kinta nuo -1,090 MPa iki 0,050 MPa. Erdviniai tangentiniai geodinaminiai įtėmpiai σ_{xy} kinta nuo -0,018 MPa iki 0,001 MPa, σ_{xz} kitimo ribos yra nuo -0,088 MPa iki 0,014 MPa, o σ_{yz} kinta nuo -0,064 MPa iki 0,053 MPa.

Erdviniai normaliniai geodinaminiai įtėmpiai σ_{xx} kinta nuo -0,930 MPa iki 0,041 MPa (3.11 lentelė), σ_{yy} kitimo ribos yra nuo -0,429 MPa iki 0,024 MPa, o

σ_{zz} kinta nuo $-0,493$ MPa iki $0,047$ MPa. Erdviniai tangentiniai geodinaminiai įtempiai σ_{xy} kinta nuo $-0,027$ MPa iki $0,123$ MPa, σ_{xz} kitimo ribos yra nuo $-0,274$ MPa iki $0,053$ MPa, o σ_{yz} kinta nuo $-0,004$ MPa iki $0,067$ MPa.

Apibendrinant šiame poskyryje gautuosius tyrimo rezultatus, nustatyta, kad erdvinius Žemės plutos deformacijų rodiklius bei geodinaminių įtempių pokyčius, atsižvelgiant į Žemės formos sferiškumą, galime įvertinti naudojant tiesioginį erdvinių deformacijų tenzoriaus elementų transformavimą iš globalios Žemės erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinačių sistemos į pasirinktą (kiekvieno baigtinio elemento ar vieningoje baigtinių elementų) lokaliąją horizontalinę koordinačių sistemą (2.4.4 poskyris), taip išvengiant tarpinių matematinių veiksmų susijusių su koordinačių perskaičiavimu.

3.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo rezultatai

Siekiant aprobuoti antrajame skyriuje pateiktą horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimo metodiką, nagrinėjamo Baltijos regiono teritorija aproksimuojama plokščiaisiais trikampaiais baigtiniais elementais. Sudarytas erdvinių baigtinių (trikampių) elementų tinklas pateiktas 3.5 paveiksle.

Žemės plutos deformacijų rodiklių nustatymo, atsižvelgiant į Žemės formos sferoidiškumą, tyrimus išskaidysime į dvi dalis:

- įvertinsime horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklius kiekvienam trikampiui plokščiajam baigtiniam elementui jo lokaloje horizontalinėje koordinačių sistemoje (toliau – 1 variantas);
- įvertinsime horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklius vieningoje tiriamojo regiono lokaloje horizontalinėje koordinačių sistemoje (toliau – 2 variantas).

Horizontaliųjų deformacijų tenzoriaus komponentės 2 variantu nustatytos pagal punktų koordinačių pokyčius, pateiktus 3.7 lentelėje. Taikant (2.1.31–2.1.48) formules, įvertinti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai Baltijos regione kiekvieno plokščiojo baigtinio trikampio elemento svorio centrui pateikti 3.12 ir 3.13 lentelėse (1 variantas).

Nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai nagrinėjamo Baltijos regiono vieningoje lokaloje horizontalinėje koordinačių sistemoje pateikti 3.14 ir 3.15 lentelėse (2 variantas).

3.12 lentelė. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai (1 variantas)**Table 3.12.** Indicators of horizontal strains of the Earth's crust (1st variant)

Nr.	$e_{xx} \cdot 10^{-8}$	$e_{yy} \cdot 10^{-8}$	$e_{xy} \cdot 10^{-8}$	$e_{yx} \cdot 10^{-8}$	$E_1 \cdot 10^{-8}$	$E_2 \cdot 10^{-8}$	w^o	$\Delta \cdot 10^{-8}$
Lokalsiosios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas LAMA								
1	1,891	1,179	–4,027	–1,324	4,234	–1,164	131	3,070
2	–1,785	2,710	–1,512	–3,563	3,852	–2,927	–24	0,925
11	2,655	0,920	3,114	–4,876	3,023	0,551	113	3,574
12	–2,306	1,618	0,879	–3,325	1,968	–2,656	–16	–0,688
Lokalsiosios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas RIGA								
1	2,022	1,316	–3,743	–1,368	4,249	–0,911	131	3,339
2	–1,697	2,850	–1,298	–3,701	3,955	–2,802	–23	1,153
3	–4,770	2,718	–3,121	–3,923	4,114	–6,166	–22	–2,052
Lokalsiosios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas SASS								
7	–2,931	1,617	0,867	–3,270	1,915	–3,228	76	–1,314
8	–3,220	0,976	–0,964	–3,371	1,894	–4,139	–23	–2,244
9	–1,524	1,122	–0,764	–2,136	1,761	–2,164	–24	–0,403
10	1,927	3,964	–4,458	–4,792	7,681	–1,790	–39	5,891
11	3,592	1,285	2,587	–5,425	4,268	0,610	115	4,878
12	–2,263	1,862	0,542	–3,773	2,419	–2,821	–19	–0,401
Lokalsiosios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas VIS0								
1	2,319	1,415	–4,338	–1,512	4,827	–1,092	131	3,735
2	–1,481	3,087	–1,899	–4,118	4,581	–2,975	–26	1,606
3	–4,531	2,951	–3,461	–4,385	4,631	–6,211	–23	–1,580

3.13 lentelė. Santykinės deformacijos koordinatės ašių kryptimis (1 variantas)**Table 3.13.** Relative strains by directions of coordinate axes (1st variant)

	Nr.	$E_x \cdot 10^{-8}$	$E_y \cdot 10^{-8}$	$E \cdot 10^{-8}$	ω''
Lokalsios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas LAMA	1	0,904	–5,850	5,919	–0,003
	2	–4,569	–6,018	7,556	0,002
	11	1,607	–2,216	2,737	0,008
	12	–4,182	–3,063	5,184	0,004
Lokalsios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas RIGA	1	0,706	–5,111	5,160	–0,002
	2	–4,569	–6,018	7,556	0,002
	3	1,607	–2,216	2,737	0,008
Lokalsios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas SASS	7	–4,547	–2,403	5,143	0,004
	8	–4,196	–4,335	6,033	0,002
	9	–2,646	–2,900	3,926	0,001
	10	–2,037	–9,250	9,471	0,000
	11	2,307	–2,838	3,658	0,008
	12	–4,126	–3,231	5,240	0,004
Lokalsios horizontalinės koordinatės sistemos pradžia – GPS punktas VIS0	4	8,410	–3,540	9,125	0,012
	5	6,523	–5,020	8,231	0,010
	6	8,410	–3,540	9,125	0,012

Nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai nagrinėjamo Baltijos regiono vieningoje lokaliajoje horizontalinėje koordinačių sistemoje pateikti 3.14 ir 3.15 lentelėse (2 variantas).

3.14 lentelė. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai (2 variantas)

Table 3.14. Indicators of horizontal deformations of the Earth's crust (2nd variant)

Nr.	$e_{xx} \cdot 10^{-8}$	$e_{yy} \cdot 10^{-8}$	$e_{xy} \cdot 10^{-8}$	$e_{yx} \cdot 10^{-8}$	$E_1 \cdot 10^{-8}$	$E_2 \cdot 10^{-8}$	w°	$\Delta \cdot 10^{-8}$
1	2,319	1,415	-4,338	-1,512	4,827	-1,092	131	3,735
2	-1,481	3,087	-1,899	-4,118	4,581	-2,975	-26	1,606
3	-4,531	2,951	-3,461	-4,385	4,631	-6,211	-23	-1,580
4	16,967	4,658	-10,417	-9,659	22,587	-0,962	119	21,624
5	9,110	0,700	3,956	-7,496	9,468	0,343	101	9,811
6	7,684	1,161	2,119	-7,139	8,538	0,307	71	8,844
7	-2,714	1,622	0,923	-3,121	1,885	-2,977	77	-1,092
8	-2,860	0,770	-1,178	-3,181	1,791	-3,881	-25	-2,090
9	-1,369	1,012	-0,864	-2,030	1,696	-2,052	-25	-0,357
10	1,770	4,013	-4,161	-4,888	7,553	-1,770	-38	5,784
11	2,823	1,216	3,079	-5,295	3,389	0,651	117	4,040
12	-2,256	1,926	0,710	-3,773	2,427	-2,757	-18	-0,331

3.15 lentelė. Santykinės deformacijos koordinačių ašių kryptimis (2 variantas)

Table 3.15. Relative strains by directions of coordinate axes (2nd variant)

Nr.	$E_x \cdot 10^{-8}$	$E_y \cdot 10^{-8}$	$E \cdot 10^{-8}$	ω''	Nr.	$E_x \cdot 10^{-8}$	$E_y \cdot 10^{-8}$	$E \cdot 10^{-8}$	ω''
1	0,904	-5,850	5,919	-0,003	7	-4,336	-2,198	4,862	0,004
2	-4,569	-6,018	7,556	0,002	8	-3,630	-4,359	5,672	0,002
3	-7,482	-7,846	10,842	0,001	9	-2,381	-2,894	3,748	0,001
4	12,309	-20,076	23,549	-0,001	10	-2,243	-9,049	9,323	0,001
5	8,410	-3,540	9,125	0,012	11	1,607	-2,216	2,737	0,009
6	6,523	-5,020	8,231	0,010	12	-4,182	-3,063	5,184	0,005

Remiantis gautais rezultatais (2 variantas) nustatyta, kad Baltijos regione Žemės plutos santykinės linijinės e_{xx} deformacijos kinta nuo $-4,531 \cdot 10^{-8}$ iki $16,967 \cdot 10^{-8}$, e_{yy} kinta nuo $0,700 \cdot 10^{-8}$ iki $4,658 \cdot 10^{-8}$, santykinės šlyties e_{xy} deformacijos kinta nuo $-4,338 \cdot 10^{-8}$ iki $3,956 \cdot 10^{-8}$, e_{yx} kinta nuo $-1,512 \cdot 10^{-8}$ iki $-9,659 \cdot 10^{-8}$. Didžiausiojo santykinio pailgėjimo E_1 kryptimi vyrauja teigiamos reikšmės ir kitimo ribos yra nuo $1,696 \cdot 10^{-8}$ iki $22,587 \cdot 10^{-8}$. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo E_1 kryptimi vyrauja neigiamos reikšmės (išskyrus trikampiuose Nr. 5, Nr. 6 ir Nr. 11) ir kinta nuo $-6,211 \cdot 10^{-8}$ iki $0,651 \cdot 10^{-8}$. Dilatacijos reikšmės kinta nuo $-2,090 \cdot 10^{-8}$ iki $21,624 \cdot 10^{-8}$. Deformacijų reikšmės pagal abscisių ašį 5 trikampiuose yra teigiamos, 7 trikampiuose –

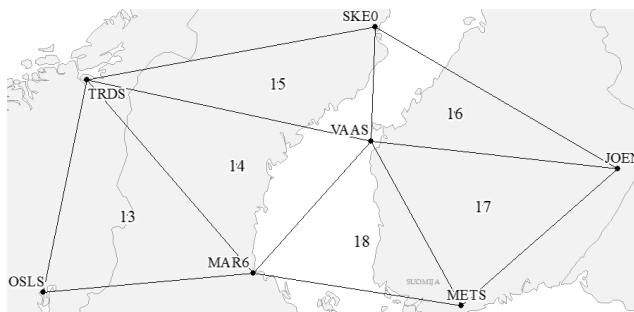
neigiamos, o reikšmių kitimo ribos yra nuo $-7,482 \cdot 10^{-8}$ iki $12,309 \cdot 10^{-8}$. Deformacijų reikšmės pagal ordinačių ašį visuose trikampiuose yra neigiamos ir kinta nuo $-20,076 \cdot 10^{-8}$ iki $2,198 \cdot 10^{-8}$ (3.15 lentelė).

Atlikti tyrimai parodė (3.12–3.15 lentelės), kad beveik visų horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų charakteristikų didžiausios reikšmės yra trikampyje Nr. 4. Minėto trikampio viršūnės sutampa su EUREF GPS tinklo punktais MAR6, METS ir VIS0. Todėl atsižvelgiant į 3.2–3.4 paveiksluose pateiktus punktų koordinačių pokyčių grafikus, tikėtina, kad trikampyje Nr. 4 tokias anomalines Žemės plutos deformacijų skaitines reikšmes galėjo įtakoti GPS tinklo punktų METS ir MAR6 koordinačių pokyčiai 2011 m.

Didžiausi horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių skaitinių reikšmių skirtumai (1 variantas) nustatyti trikampiuose Nr. 1 ir Nr. 11, t. y. tuose trikampiuose, kurie yra labiau nutolę nuo punkto VIS0, o rodiklių, nustatytų kiekvieno baigtinio elementų svorio centrui, esančių arčiau horizontalinės topocentrinės koordinačių sistemos pradžios taško (punkto VIS0) skirtumai yra mažesni. Įvertinant apibendrintąsias horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų charakteristikas Baltijos regione (2.1.28–2.1.30), nustatyta, kad visos blokinės struktūros santykinės linijinės deformacijos rodikliai e_{xx} yra $1,944 \cdot 10^{-8}$, e_{yy} yra $1,977 \cdot 10^{-8}$, o santykinė šlyties deformacijos rodiklis e_{xy} yra $-5,851 \cdot 10^{-8}$.

Nustatytos apibendrintosios svarbiausiosios deformacijų rodiklių reikšmės: didžiausiojo santykinio pailgėjimo yra $7,812 \cdot 10^{-8}$, mažiausiojo santykinio pailgėjimo yra $-3,891 \cdot 10^{-8}$, dilatacijos – $3,921 \cdot 10^{-8}$. Viso struktūrinio bloko posūkis yra -44° .

Atsižvelgiant į tai, Žemės plutos deformacijų ir įtempių Baltijos regione tyrimų arealą išplėsimė, prijungiant naujus EUREF GPS tinklo punktus (toliau – 3 variantas). Sudaryti nauja baigtinių elementų schema pateikta 3.6 paveiksle. Gautieji tyrimų rezultatai pateikti 3.16 ir 3.17 lentelėse.



3.6 pav. Baigtinių elementų (trikampių) tinklo schema (2)

Fig. 3.6. The scheme of finite element's (triangle's) network (2)

3.19 lentelė. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai (3 variantas)**Table 3.19.** Indicators of horizontal deformations of the Earth's crust (3rd variant)

Nr.	$e_{xx} \cdot 10^{-8}$	$e_{yy} \cdot 10^{-8}$	$e_{xy} \cdot 10^{-8}$	$e_{yx} \cdot 10^{-8}$	$E_1 \cdot 10^{-8}$	$E_2 \cdot 10^{-8}$	w^o	$\Delta \cdot 10^{-8}$
13	0,301	3,439	-1,582	1,048	1,675	-0,327	124	1,348
14	1,029	-1,480	-2,329	6,091	6,727	0,393	71	7,120
15	-4,818	-2,726	-1,433	6,282	6,658	-5,195	-10	1,464
16	-2,605	-6,285	-0,465	4,724	6,041	-3,923	69	2,119
17	3,408	-4,284	-1,982	4,219	6,973	6,539	49	7,627
18	5,963	-0,143	-2,718	7,103	15,060	-1,993	47	13,100

3.20 lentelė. Santykinės deformacijos koordinačių ašių kryptimis (3 variantas)**Table 3.20.** Relative strains by directions of coordinate axes (3rd variant)

Nr.	$E_x \cdot 10^{-8}$	$E_y \cdot 10^{-8}$	$E \cdot 10^{-8}$	ω''	Nr.	$E_x \cdot 10^{-8}$	$E_y \cdot 10^{-8}$	$E \cdot 10^{-8}$	ω''
13	-0,747	1,857	2,002	0,005	16	-7,33	-6,750	9,964	-0,006
14	-5,061	-3,809	6,334	0,001	17	-0,812	-6,267	6,319	-0,002
15	-11,100	-4,159	11,870	-0,001	18	-1,141	-17,010	17,050	-0,012

Nustatyta (3.19 lentelė), kad Žemės plutos santykinės linijinės e_{xx} deformacijos kinta nuo $-4,818 \cdot 10^{-8}$ iki $0,301 \cdot 10^{-8}$, e_{yy} kinta nuo $-6,285 \cdot 10^{-8}$ iki $3,439 \cdot 10^{-8}$, santykinės šlyties e_{xy} deformacijos kinta nuo $-2,718 \cdot 10^{-8}$ iki $-0,465 \cdot 10^{-8}$, e_{yx} kinta nuo $1,048 \cdot 10^{-8}$ iki $7,103 \cdot 10^{-8}$. Didžiausias santykinis pailgėjimas kinta nuo $1,675 \cdot 10^{-8}$ iki $15,060 \cdot 10^{-8}$. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi reikšmės kinta nuo $-5,195 \cdot 10^{-8}$ iki $6,539 \cdot 10^{-8}$. Dilatacijos reikšmės kinta nuo $1,348 \cdot 10^{-8}$ iki $13,100 \cdot 10^{-8}$. Pagal pateiktus 3.20 lentelėje duomenis matyti, kad deformacijų reikšmės pagal absčių ašį yra neigiamos, o reikšmių kitimo ribos yra nuo $-11,100 \cdot 10^{-8}$ iki $-0,747 \cdot 10^{-8}$. Deformacijų reikšmės pagal ordinačių ašį taip pat yra neigiamos (išskyrus trikampyje Nr. 13) ir kinta nuo $-17,010 \cdot 10^{-8}$ iki $1,857 \cdot 10^{-8}$.

Nustatytų geodinaminių įtempių pokyčiai pagal anksčiau minėtus abu tyrimų variantus pateikti 3.21–3.23 lentelėse.

3.21 lentelė. Geodinaminių įtempių pokyčiai (3 variantas)**Table 3.21.** Changes of geodynamic stresses (3rd variant)

Trikampio Nr.	Normaliniai ir tangentiniai įtempiai			Svarbiausieji įtempiai	
	σ_{xx} , MPa	σ_{yy} , MPa	σ_{xy} , MPa	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa
13	0,0231	0,0082	-0,0004	0,0230	0,0082
14	0,0005	-0,0009	-0,0007	0,0008	-0,0012
15	-0,0041	-0,0029	-0,0004	-0,0028	-0,0042
16	-0,0031	-0,0052	-0,0130	0,0089	-0,0170
17	0,0017	-0,0026	-0,0006	0,0018	-0,0026
18	0,0044	0,0010	-0,0008	0,0046	0,0008

3.22 lentelė. Geodinaminių įtempių pokyčiai (1 variantas)**Table 3.22.** Changes of geodynamic stresses (1st variant)

Nr.	σ_{xx} , MPa	σ_{yy} , MPa	σ_{xy} , MPa	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa
Lokalsiosios horizontalinės koordinatinių sistemos pradžia – GPS punktas LAMA					
1	0,0016	0,0012	–0,0011	0,0026	0,0003
2	–0,0008	0,0017	–0,0004	0,0018	–0,0009
11	0,0022	0,0012	0,0009	0,0027	0,0007
12	–0,0014	0,0008	0,0003	0,0008	–0,0014
Lokalsiosios horizontalinės koordinatinių sistemos pradžia – GPS punktas RIGA					
1	0,0018	0,0014	–0,0010	0,0026	0,0005
2	–0,0007	0,0018	–0,0004	0,0019	–0,0008
3	–0,0031	0,0011	–0,0009	0,0013	–0,0032
Lokalsiosios horizontalinės koordinatinių sistemos pradžia – GPS punktas SASS					
7	–0,0019	0,0007	0,0002	0,0007	–0,0019
8	–0,0022	0,0001	–0,0003	0,0002	–0,0023
9	–0,0009	0,0006	–0,0002	0,0006	–0,0010
10	0,0022	0,0033	–0,0012	0,0041	0,0014
11	0,0029	0,0016	0,0007	0,0032	0,0013
12	–0,0013	0,0010	0,0002	0,0010	–0,0014
Lokalsiosios horizontalinės koordinatinių sistemos pradžia – GPS punktas VIS0					
4	0,0135	0,0066	–0,0029	0,0146	0,0056
5	0,0069	0,0022	0,0011	0,0072	0,0020
6	0,0060	0,0023	–0,0006	0,0061	0,0022

3.23 lentelė. Geodinaminių įtempių pokyčiai (2 variantas)**Table 3.23.** Changes of geodynamic stresses (2nd variant)

Trikampio Nr.	Normaliniai ir tangentiniai įtempiai			Svarbiausieji įtempiai	
	σ_{xx} , MPa	σ_{yy} , MPa	σ_{xy} , MPa	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa
1	0,0176	0,0054	–0,0012	0,0177	0,0053
2	–0,0005	0,0020	–0,0005	0,0021	–0,0006
3	–0,0028	0,0014	–0,0010	0,0016	–0,0031
4	0,0135	0,0066	–0,0029	0,0146	0,0056
5	0,0069	0,0022	0,0011	0,0072	0,0020
6	0,0060	0,0023	–0,0006	0,0061	0,0022
7	–0,0017	0,0007	0,0003	0,0007	–0,0018
8	–0,0020	0,0000	–0,0003	0,0001	–0,0020
9	–0,0008	0,0005	–0,0002	0,0005	–0,0009
10	0,0021	0,0032	–0,0012	0,0040	0,0014
11	0,0023	0,0014	0,0009	0,0029	0,0009
12	–0,0013	0,0010	0,0002	0,0010	–0,0013

Iš pateiktų tyrimo rezultatų (3.22 lentelė) matyti, kad priklausomai nuo pasirinktos horizontalinės koordinačių sistemos pradžios Baltijos regione, geodinaminių įtempių pokyčių (1 variantas) įverčiai gali skirtis iki 10 % rodiklio reikšmės. Geodinaminių įtempių pokyčiai (2 ir 3 variantai) Baltijos regione kinta: σ_{xx} nuo $-0,0041$ MPa iki $0,0231$ MPa, σ_{yy} nuo $-0,0052$ MPa iki $0,0082$ MPa, o σ_{xy} nuo $-0,0130$ MPa iki $0,0011$ MPa (3.22 ir 3.23 lentelės). Didžiausiojo ir mažiausiojo geodinaminių įtempių kitimo ribos yra: σ_1 nuo $-0,0028$ MPa iki $0,0230$ MPa, σ_2 nuo $-0,0170$ MPa iki $0,0082$ MPa.

3.4. Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo ir patikimumo įvertinimas

Taikant horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių tikslumo įvertinimo metodiką (2.2.2 poskyris), nustatytos horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių vidutinės kvadratinės paklaidos pateiktos 3.21 lentelėje.

3.21 lentelė. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų vidutinės kvadratinės paklaidos
Table 3.21. Mean square errors of horizontal Earth's crust strain's

Nr.	$m_{e_{xx}}^*$	$m_{e_{yy}}^*$	$m_{e_{xy}}^*$	$m_{e_{yx}}^*$	$m_{E_1}^*$	$m_{E_3}^*$	m_{Δ}^*
1	1,609	0,690	0,992	1,572	1,338	1,211	1,751
2	1,176	1,094	1,237	0,697	1,070	1,121	1,607
3	1,822	0,661	1,053	1,503	0,913	1,680	1,938
4	1,729	0,478	1,142	0,809	1,449	0,812	1,794
5	1,328	0,578	1,220	0,679	1,304	0,620	1,448
6	1,407	0,615	0,605	0,822	1,300	0,650	1,535
7	1,347	0,520	0,652	1,159	0,581	1,310	1,444
8	1,285	0,783	1,179	1,161	0,932	1,239	1,505
9	0,902	0,890	1,416	0,586	0,952	0,959	1,267
10	1,385	0,299	0,478	0,849	0,731	0,987	1,417
11	1,262	0,543	0,921	0,774	1,119	0,700	1,374
12	1,100	0,604	1,005	0,625	0,657	1,055	1,255
13	0,283	0,133	1,308	0,285	1,105	0,772	1,355
14	0,168	0,508	0,625	0,134	0,496	0,250	0,535
15	1,695	0,921	1,011	1,318	0,940	1,667	1,929
16	1,975	0,610	0,729	1,887	0,904	1,848	2,067
17	0,303	0,633	0,702	0,296	0,537	0,498	0,702
18	0,448	1,283	1,328	0,416	0,997	0,947	0,136

* Tikrosios reikšmės lygios $m \cdot 10^{-8}$.

Pagal tyrimo rezultatus (3.14 ir 3.24 lentelės) nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykiai pateikti 3.25 lentelėje.

3.25 lentelė. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykis

Table 3.25. The ratio of indications of horizontal Earth's crust strains and their mean square errors

Nr.	$\frac{ e_{xx} }{m_{e_{xx}}}$	$\frac{ e_{yy} }{m_{e_{yy}}}$	$\frac{ e_{xy} }{m_{e_{xy}}}$	$\frac{ e_{yx} }{m_{e_{yx}}}$	$\frac{ E_1 }{m_{E_1}}$	$\frac{ E_2 }{m_{E_2}}$	$\frac{ \Delta }{m_{\Delta}}$
1	1,44	2,05	4,37	0,96	3,61	0,90	2,13
2	1,26	2,82	1,54	5,91	4,28	2,65	1,00
3	2,49	4,46	3,29	2,92	5,07	3,70	0,82
4	9,81	9,74	9,12	11,94	15,59	1,18	12,05
5	6,86	1,21	3,24	11,04	7,26	0,55	6,78
6	5,46	1,89	3,50	8,68	6,57	0,47	5,76
7	2,01	3,12	1,42	2,69	3,24	2,27	0,76
8	2,23	0,98	1,00	2,74	1,92	3,13	1,39
9	1,52	1,14	0,61	3,46	1,78	2,14	0,28
10	1,28	13,42	8,71	5,76	10,33	1,79	4,08
11	2,24	2,24	3,34	6,84	3,03	0,93	2,94
12	2,05	3,19	0,71	6,04	3,69	2,61	0,26
13	1,06	25,86	1,21	0,27	1,52	0,42	0,99
14	6,13	2,91	3,73	0,02	13,56	1,57	13,31
15	2,84	2,96	1,42	0,21	7,08	3,12	0,76
16	1,32	10,30	0,64	0,40	6,68	2,12	1,03
17	11,25	6,77	2,82	0,07	12,99	13,13	10,86
18	13,31	0,11	2,05	0,06	15,11	2,10	9,63

Iš nustatytų horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykių matyti, kad horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai viršija vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmes (3.25 lentelė): santykinų linijinių deformacijų rodiklių reikšmės e_{xx} – apie 3 kartus, e_{yy} – apie 4 kartus, santykinų šlyties deformacijų rodiklių reikšmės e_{xy} – apie 3 kartus, e_{yx} – apie 6 kartus, didžiausiojo santykinio pailgėjimo rodiklių reikšmės apie 6 kartus, mažiausiojo santykinio pailgėjimo apie 2 kartus, dilatacijos apie 3 kartus.

Nustatytos erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių vidutinės kvadratinės paklaidos pateiktos 3.26 lentelėje, o erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių (3.8 lentelė) ir jų vidutinių paklaidų (3.26 lentelė) santykis pateiktas 3.27 lentelėje.

3.26 lentelė. Erdvinių Žemės plutos deformacijų vidutinės kvadratinės paklaidos**Table 3.26.** Mean square errors of horizontal Earth's crust strain's

Tenzoriaus komponentės	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
$m_{e_{xx}} \cdot 10^{-6}$	0,575	0,486	0,110	0,399	0,453	0,581
$m_{e_{yy}} \cdot 10^{-6}$	0,105	0,122	0,031	0,131	0,105	0,121
$m_{e_{zz}} \cdot 10^{-6}$	1,122	1,785	0,422	1,903	0,961	1,265
$m_{e_{xy}} \cdot 10^{-6}$	0,224	0,191	0,043	0,153	0,173	0,225
$m_{e_{xz}} \cdot 10^{-6}$	1,028	0,866	0,196	0,713	0,803	1,037
$m_{e_{yx}} \cdot 10^{-6}$	0,273	0,318	0,079	0,346	0,275	0,311
$m_{e_{yz}} \cdot 10^{-6}$	0,486	0,570	0,141	0,612	0,486	0,554
$m_{e_{zx}} \cdot 10^{-6}$	0,627	0,993	0,235	1,083	0,542	0,707
$m_{e_{zy}} \cdot 10^{-6}$	0,244	0,378	0,090	0,406	0,208	0,275

3.27 lentelė. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykis**Table 3.27.** The ratio of indications of spatial Earth's crust strains and their mean square errors

Tenzoriaus komponentės	Baigtiniai elementai					
	1	2	3	4	5	6
$ e_{xx} /m_{e_{xx}}$	1,04	2,03	0,25	0,79	3,37	1,80
$ e_{yy} /m_{e_{yy}}$	5,97	1,07	2,00	2,42	3,31	2,88
$ e_{zz} /m_{e_{zz}}$	1,17	1,54	0,73	0,04	0,50	0,51
$ e_{xy} /m_{e_{xy}}$	1,18	3,10	0,49	1,52	5,57	2,54
$ e_{xz} /m_{e_{xz}}$	5,72	1,13	0,27	0,46	2,08	1,09
$ e_{yx} /m_{e_{yx}}$	5,18	0,61	1,43	0,65	1,99	2,21
$ e_{yz} /m_{e_{yz}}$	2,97	0,43	0,56	0,40	1,33	1,39
$ e_{zx} /m_{e_{zx}}$	2,03	3,00	1,37	0,07	0,74	0,82
$ e_{zy} /m_{e_{zy}}$	2,26	4,19	2,29	0,15	1,14	0,94

Pagal erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykius (3.27 lentelė) nustatyta, jog erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės taip pat viršija vidutinės kvadratinės

paklaidos reikšmės vidutiniškai: e_{xx} – apie 2 kartus, e_{yy} – apie 3 kartus, e_{zz} – apie 1 kartą, e_{xy} – apie 2–3 kartus, e_{xz} – apie 2 kartus, e_{yx} – apie 2 kartus, e_{yz} , e_{xz} , e_{zy} – apie 2–3 karto.

Atsižvelgiant į gautuosius tyrimo rezultatus, galima teigti, kad nustatytos horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės yra patikimos ir atspindi tikrąsias teritorijos dabartines geodinaminio aktyvumo charakteristikas.

3.5. Žemės plutos judesių tyrimo Lietuvos teritorijoje rezultatai

Iki šiol detalūs horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai Lietuvos teritorijoje (Zakarevičius 2003; Stanionis 2005) buvo atlikti pagal nevienodo tikslumo geodezinių tinklų matavimų duomenis, t. y. iki 1940 metų sudaryto trianguliacijos tinklo bei 1992–1994 metais sudarytų nulinės bei pirmosios klasės *GPS* tinklų matavimų duomenis (Zakarevičius 1996b, 2000b). Pakartotinai pirmosios klasės *GPS* tinklo punktai (45 punktai) buvo matuoti 2007 m., todėl atsirado galimybė žymiai tiksliau ir patikimiau įvertinti Žemės plutos deformacijų skaitmeninių rodiklių reikšmes Lietuvos teritorijoje, panaudojant kartotinius *GPS* matavimų duomenis.

Atstumai tarp valstybinio Lietuvos pirmosios klasės *GPS* punktų yra apie 50 km, todėl Lietuvos teritorijoje Žemės plutos deformacijas ir įtempius galima ištirti žymiai detaliau nei Baltijos regione. Pažymėtina, kad šiame darbe nagrinėjamo Baltijos regiono tyrimų areale, didelė dalis Lietuvos teritorijos patenka į pirmąjį plokščiąjį trikampį elementą, o visa vakarinė Lietuvos dalis patenka į antrąjį (3.5 pav.).

Siekiant išsiaiškinti, ar Žemės plutos rodiklių dėsningumai Lietuvos teritorijoje atitinka bendruosius horizontaliųjų Žemės plutos judesių bruožus didesnėje teritorijoje, šiame poskyryje pateikti Žemės plutos deformacijų ir įtempių rodiklių ir jų skaidos Lietuvoje tyrimų rezultatai.

Horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimams naudojami skirtingais laikotarpiais atliktų matavimų *GPS* tinklo punktų plokštuminės koordinatės, nustatytos skersinės cilindrinės Merkatoriaus projekcijos stačiakampėje LKS 94 koordinačių sistemoje. Norint patikrinti anksčiau nustatytų rezultatų patikimumą, sudaryta kitokia, nei (Zakarevičius 2003; Stanionis 2005) darbuose, kartotinių matavimų baigtinių elementų tinklo schema (Zakarevičius *et al.* 2011). Pagal 2.1.2 poskyryje pateiktą metodiką, įvertinti svarbiausių horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai Lietuvos teritorijoje (D priedas, D.1 lentelė).

Nustatyta, kad dilatacijos kitimo ribos yra nuo $-16,00 \cdot 10^{-7}$ iki $9,33 \cdot 10^{-7}$. Iš 69 trikampių net 47 trikampiuose dilatacijos reikšmės yra neigiamos. Vidutinė neigiama dilatacijos reikšmė yra $3,70 \cdot 10^{-7}$, o vidutinė teigiama dilatacijos reikšmė – $1,88 \cdot 10^{-7}$ (D.1 lentelė). Svarbiausių deformacijų didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi vyrauja teigiamos deformacijos, t. y. iš 69 trikampių 51 trikampių deformacijos yra teigiamos, o 17 trikampių – neigiamos. Didžiausios teigiamos deformacijos yra trikampyje Nr. 31 ($5,73 \cdot 10^{-7}$), trikampyje Nr. 5 ($6,05 \cdot 10^{-7}$), trikampyje 52 ($6,98 \cdot 10^{-7}$) bei trikampyje Nr. 4 ($7,91 \cdot 10^{-7}$). Didžiausios neigiamos deformacijos yra trikampyje Nr. 21 ($-2,48 \cdot 10^{-7}$), trikampyje Nr. 16 ($-2,53 \cdot 10^{-7}$), trikampyje 52 ($-2,91 \cdot 10^{-7}$) ir trikampyje Nr. 45 ($-2,95 \cdot 10^{-7}$) (D.1 lentelė).

Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi, kuri statmena didžiausiojo pailgėjimo krypčiai, vyrauja neigiamos deformacijos. Iš 69 trikampių net 67 trikampių deformacijos yra neigiamos ir tik 2 trikampių – teigiamos. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi neigiamos deformacijos kinta nuo $-8,74 \cdot 10^{-7}$ (trikampis Nr. 17) iki $-1,18 \cdot 10^{-7}$ (trikampis Nr. 17). Teigiamos mažiausiojo santykinio pailgėjimo deformacijos yra trikampyje Nr. 6 ($2,89 \cdot 10^{-7}$) ir trikampyje Nr. 4 ($7,91 \cdot 10^{-7}$) (D.1 lentelė). Deformacijos pagal abscisių ašį kinta nuo $-10,10 \cdot 10^{-7}$ iki $10,20 \cdot 10^{-7}$. Deformacijos pagal ordinačių ašį kinta nuo $-10,70 \cdot 10^{-7}$ iki $10,00 \cdot 10^{-7}$ (D.1 lentelė).

Normalinio įtempio σ_{xx} pokyčio neigiamos reikšmės kinta nuo $-0,757$ MPa iki $-0,008$ MPa, teigiamos – nuo $0,016$ MPa iki $0,787$ MPa. Trikampiuose Nr. 28 ir Nr. 29 σ_{xx} kitimas nenustatytas. Normalinio įtempio σ_{yy} pokyčio neigiamos reikšmės kinta nuo $-0,511$ MPa iki $-0,009$ MPa, teigiamos – nuo $0,021$ MPa iki $0,549$ MPa. Tangentinio įtempio σ_{xy} pokyčio neigiamos reikšmės kinta nuo $-1,066$ MPa iki $-0,002$ MPa, teigiamos – nuo $0,008$ MPa iki $0,985$ MPa (D priedas, D.2 lentelė). Maksimalaus ir minimalaus santykinio įtempių pokyčių kitimo ribos nustatytos pagal 3.13 lentelėje pateiktus rezultatus. Maksimalaus santykinio įtempio neigiamos reikšmės kinta nuo $-1,404$ MPa iki $-0,013$ MPa, teigiamos reikšmės yra tik dviejuose trikampiuose, t. y. trikampyje Nr. 1 ($0,149$ MPa) ir trikampyje Nr. 4 ($0,131$ MPa). Minimalaus santykinio įtempio pokyčio neigiamos reikšmės kinta nuo $-0,290$ MPa iki $-0,010$ MPa, teigiamos – nuo $0,004$ MPa iki $1,225$ MPa (D priedas, D.3 lentelė).

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad tyrimams taikytų nuolat veikiančių *EUREF GPS* stočių erdvinį stačiakampių ekvatoriinių geocentrinių koordinatinių pokyčių vidutiniai metiniai greičiai stotyse yra: X koordinatės $17\text{--}18$ mm/per

- metus, Y koordinatės 14–15 mm/per metus, Z koordinatės 9–10 mm/per metus.
2. Koordinacijų pokyčių nustatymo vidutinės kvadratinės paklaidos yra: X koordinacijų apie 2–3 mm, Y koordinacijų neviršija 2 mm, o Z koordinacijų yra 3–4 mm.
 3. *EUREF GPS* stočių erdvinių stačiakampių ekvatorinių geocentrinių koordinacijų pokyčiai 2004–2012 m. laikotarpyje yra tiesinio pobūdžio.
 4. Erdvinių santykinų linijinių deformacijų e_{xx} reikšmių kitimo ribos yra nuo $-5,993 \cdot 10^{-6}$ iki $1,047 \cdot 10^{-6}$, e_{yy} kitimo ribos yra nuo $-0,627 \cdot 10^{-6}$ iki $0,317 \cdot 10^{-6}$, o e_{zz} kinta nuo $-2,754 \cdot 10^{-6}$ iki $0,308 \cdot 10^{-6}$. Erdvinės santykinės šlyties deformacijos e_{xy} kinta nuo $-0,571 \cdot 10^{-6}$ iki $2,643 \cdot 10^{-6}$, e_{xz} kitimo ribos yra nuo $-5,882 \cdot 10^{-6}$ iki $1,126 \cdot 10^{-6}$, e_{yx} kitimo ribos yra nuo $-0,113 \cdot 10^{-6}$ iki $1,415 \cdot 10^{-6}$, e_{yz} kinta nuo $-0,079 \cdot 10^{-6}$ iki $1,443 \cdot 10^{-6}$, e_{zx} kinta nuo $-2,975 \cdot 10^{-6}$ iki $0,400 \cdot 10^{-6}$, e_{zy} kinta nuo $-0,206 \cdot 10^{-6}$ iki $5,514 \cdot 10^{-6}$.
 5. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų didžiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmės baigtiniuose elementuose yra nuo $1,675 \cdot 10^{-8}$ iki $22,587 \cdot 10^{-8}$, mažiausiojo santykinio pailgėjimo yra nuo $-6,211 \cdot 10^{-8}$ iki $6,539 \cdot 10^{-8}$, dilatacijos yra nuo $-2,090 \cdot 10^{-8}$ iki $21,624 \cdot 10^{-8}$.
 6. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės viršija vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmes: santykinų linijinių deformacijų rodiklių reikšmės e_{xx} – apie 3 kartus, e_{yy} – apie 4 kartus, santykinų šlyties deformacijų rodiklių reikšmės e_{xy} – apie 3 kartus, e_{yx} – apie 6 kartus, didžiausiojo santykinio pailgėjimo rodiklių reikšmės E_1 – apie 6 kartus, mažiausiojo santykinio pailgėjimo E_2 – apie 2 kartus, dilatacijos Δ – apie 3 kartus.
 7. Erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės viršija vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmes: santykinų linijinių deformacijų rodiklių reikšmės: e_{xx} – apie 2 kartus, e_{yy} – apie 3 kartus, e_{zz} – apie 1 kartą, e_{xy} – apie 2–3 kartus, e_{xz} – apie 2 kartus, e_{yx} – apie 2 kartus, e_{yz} , e_{zx} , e_{zy} – apie 2–3 karto.
 8. Atsižvelgiant į horizontaliųjų ir erdvinių Žemės plutos deformacijų rodiklių ir jų vidutinių kvadratinų paklaidų santykius, galima teigti, kad nustatyti Žemės plutos deformacijų rodikliai yra patikimi ir atspindi tikrąsias teritorijos dabartines geodinaminio aktyvumo charakteristikas.
 9. Erdviniai normaliniai geodinaminiai įtempiai σ_{xx} kinta nuo $-0,930$ MPa iki $0,041$ MPa, σ_{yy} kitimo ribos yra nuo $-0,429$ MPa iki $0,024$ MPa, o

- σ_{zz} kinta nuo $-0,493$ MPa iki $0,047$ MPa. Erdviniai tangentiniai geodinaminiai įtempiai σ_{xy} kinta nuo $-0,027$ MPa iki $0,123$ MPa, σ_{xz} kitimo ribos yra nuo $-0,274$ MPa iki $0,053$ MPa, o σ_{yz} kinta nuo $-0,004$ MPa iki $0,067$ MPa.
10. Horizontaliųjų geodinaminių įtempių pokyčiai Baltijos regione kinta: σ_{xx} nuo $-0,0041$ MPa iki $0,0231$ MPa, σ_{yy} nuo $-0,0052$ MPa iki $0,0082$ MPa, o σ_{xy} nuo $-0,0130$ MPa iki $0,0011$ MPa. Didžiausiojo ir mažiausiojo geodinaminių įtempių pokyčių kitimo ribos yra: σ_1 nuo $-0,0028$ MPa iki $0,0230$ MPa, σ_2 nuo $-0,0170$ MPa iki $0,0082$ MPa.
 11. Apibendrintųjų svarbiausiųjų horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės yra: didžiausiojo bei mažiausiojo santykinų pailgėjimų yra $7,812 \cdot 10^{-8}$, mažiausiojo santykinio pailgėjimo yra $-3,891 \cdot 10^{-8}$, dilatacijos yra $3,921 \cdot 10^{-8}$. Viso struktūrinio bloko posūkis yra -44° .
 12. Nustatyta, kad erdviųjų Žemės plutos deformacijų bei įtempių tenzorių elementų, nustatytų transformavus tenzorių elementus iš erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės sistemos į pasirinktą lokaliąją horizontalinę koordinatės sistemą bei deformacijų ir įtempių tenzorių elementų, nustatytų lokaliajoje horizontalinėje koordinatės sistemoje, reikšmės gaunamos vienodos.
 13. Taikant tiesioginį Žemės plutos deformacijų ir įtempių tenzorių elementų transformavimą iš erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės sistemos į pasirinktą lokaliąją horizontalinę koordinatės sistemą, išvengiama tarpinių matematinių veiksmų, susijusių su koordinatės perskaičiavimu.
 14. Nustatyta, kad Baltijos regione, priklausomai nuo pasirinktos horizontalinės koordinatės sistemos pradžios, Žemės plutos deformacijų įverčiai gali skirtis iki 10 % rodiklio reikšmės, tačiau tai neviršytų rodiklių nustatymo vidutinių kvadratinų paklaidų.
 15. Norint sumažinti horizontalinės koordinatės sistemos pradžios pasirinkimo įtaką Žemės plutos deformacijų rodikliams, rekomenduotina, kad horizontalinės koordinatės sistemos pradžia būtų sutapatinama su trikampio baigtinio elemento viena iš viršūnių arba su vidutinėmis viršūnių koordinatėmis.
 16. Žemės plutos deformacijų ir įtempių rodiklių skaida Lietuvos teritorijoje atitinka bendruosius Žemės plutos judesių bruožus Baltijos regione.

Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo rezultatų analizė

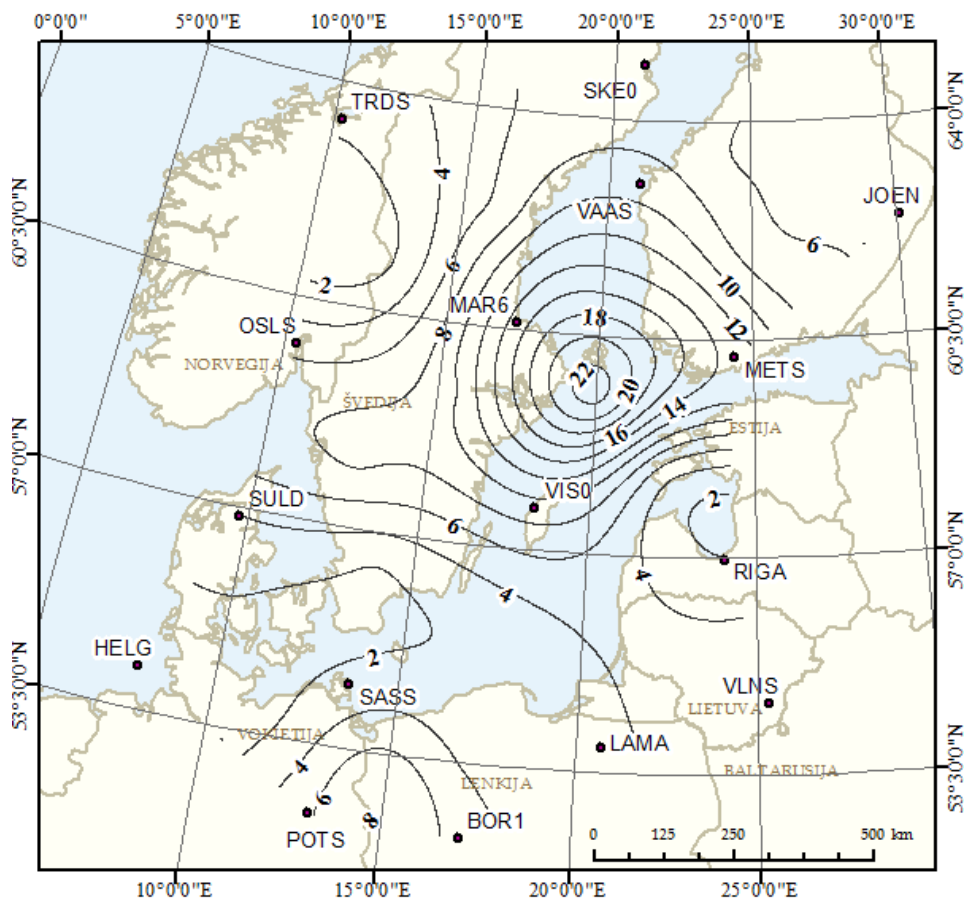
Šiame skyriuje apibendrinami trečiajame skyriuje gautieji Žemės plutos deformacijų ir įtempių tyrimo Baltijos regione rezultatai. Pagal tyrimo metu gautas Žemės plutos deformacijų ir įtempių rodiklių reikšmės sudaryti šių rodiklių skaidos žemėlapiai, įvertinti šių rodiklių kaitos dėsningumų ypatumai. Gautieji tyrimų rezultatai palyginti su kitų tyrėjų duomenimis.

Skyriaus tematika atlikti tyrimai paskelbti autoriaus straipsniuose bei konferencijų medžiagoje (Levinskaitė 2009, 2010, 2012; Zakarevičius *et al.* 2009, 2010, 2011, 2012).

4.1. Žemės plutos deformacijų ir įtempių skaidos ypatumai Baltijos regione

Naudojantis ArcGIS 10 programinės įrangos Spatial analyst programa, sudaryti didžiausiojo ir mažiausiojo santykinų pailgėjimų sklaidos Baltijos regione žemėlapiai.

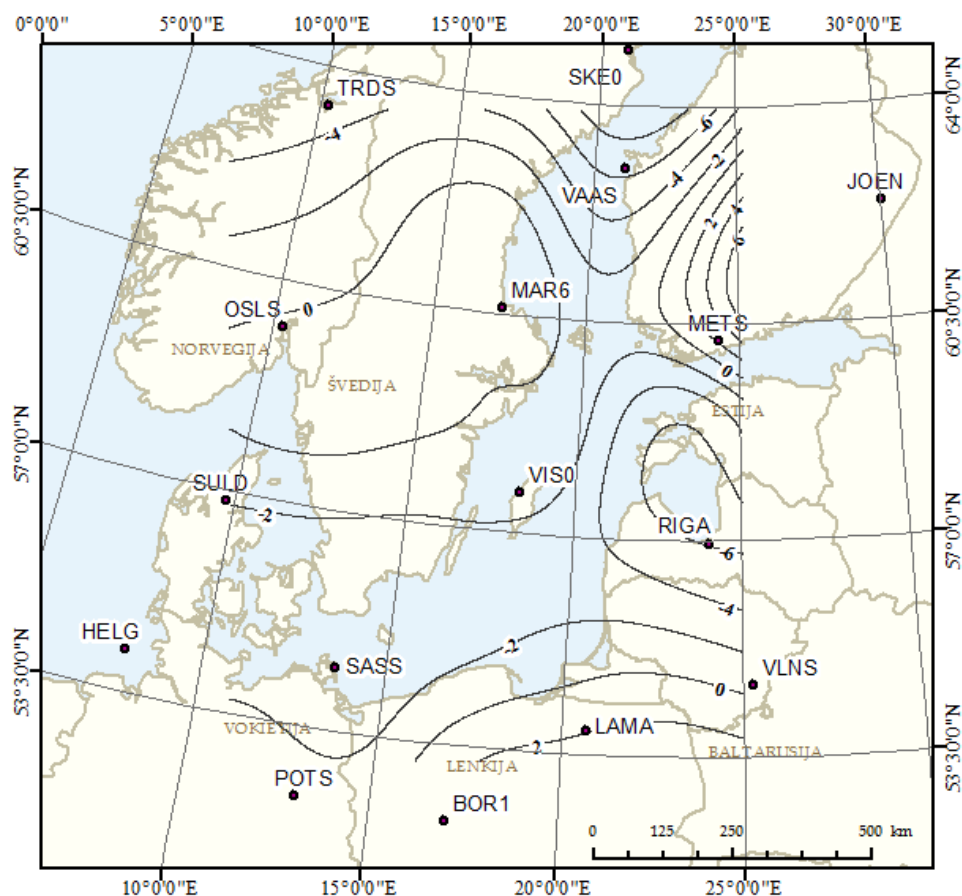
Pagal 3.14 ir 3.16 lentelėse pateiktus tyrimo rezultatus didžiausiojo ir mažiausiojo santykinio pailgėjimo skaida nagrinėjamoje Baltijos regiono teritorijoje pavaizduota atitinkamai 4.1 ir 4.2 paveiksluose.



* Pastaba. Tikrosios reikšmės lygios $E_I \cdot 10^{-8}$.

4.1 pav. Didžiausiojo santykinio pailgėjimo skaida
Fig. 4.1. The dispersion of the maximum related elongation

Kaip matyti pateiktame 4.1 paveiksle, didžiausiojo santykinio pailgėjimo itin intensyvi reikšmių kaita yra šiaurinėje nagrinėjamos Baltijos regiono teritorijos dalyje. Maksimali horizontaliųjų Žemės plutos didžiausiojo pailgėjimo rodiklių reikšmė ($22 \cdot 10^{-8}$) yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos. Nagrinėjamoje teritorijoje einant nuo didžiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmės šiaurės vakarine, pietine ir pietrytine kryptimis rodiklių reikšmių kaita lėtesnė.



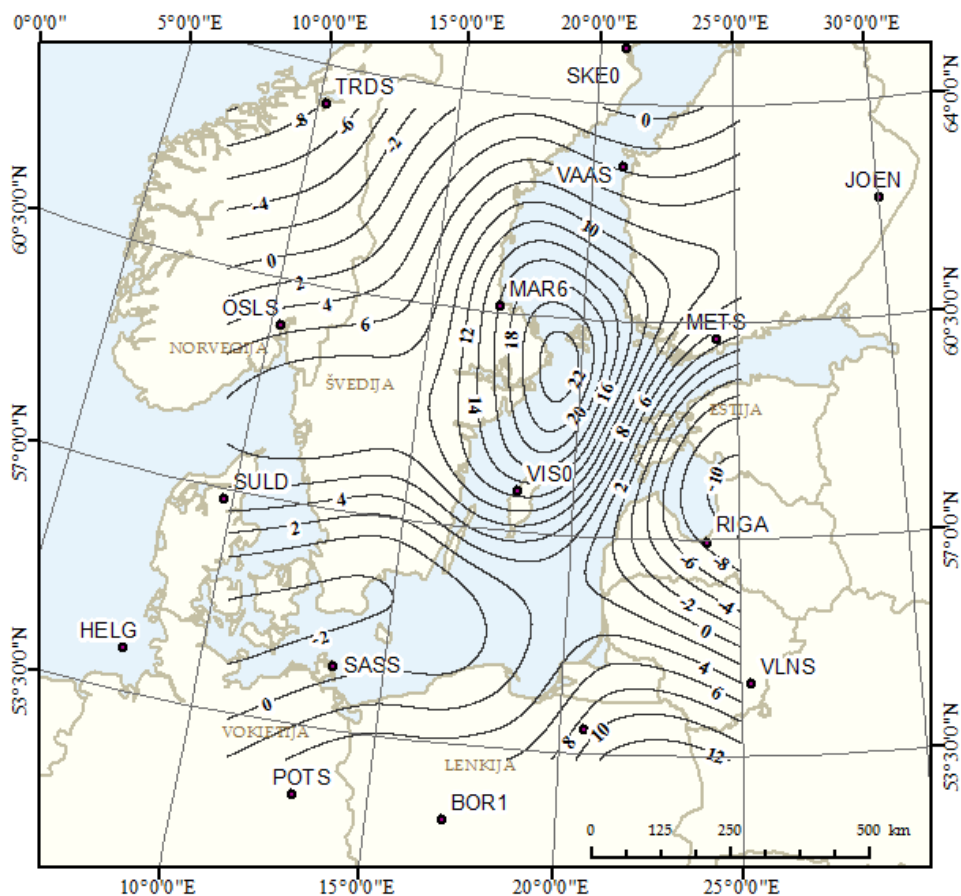
*Pastaba. Tikrosios reikšmės lygios $E_2 \cdot 10^{-8}$.

4.2 pav. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo sklaida

Fig. 4.2. The dispersion of the minimum related elongation

Mažiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmių sklaida atvaizduota (4.2 pav.). Itin intensyvi reikšmių kaita yra 60°–64° šiaurės platumos ir 20°–25° rytų ilgumos ribose. Kitose nagrinėjamos teritorijos dalyse reikšmių intensyvumas žymiai mažesnis.

Dilatacijos reikšmių (3.14 ir 3.16 lentelės) sklaida pavaizduota 4.3 paveiksle.



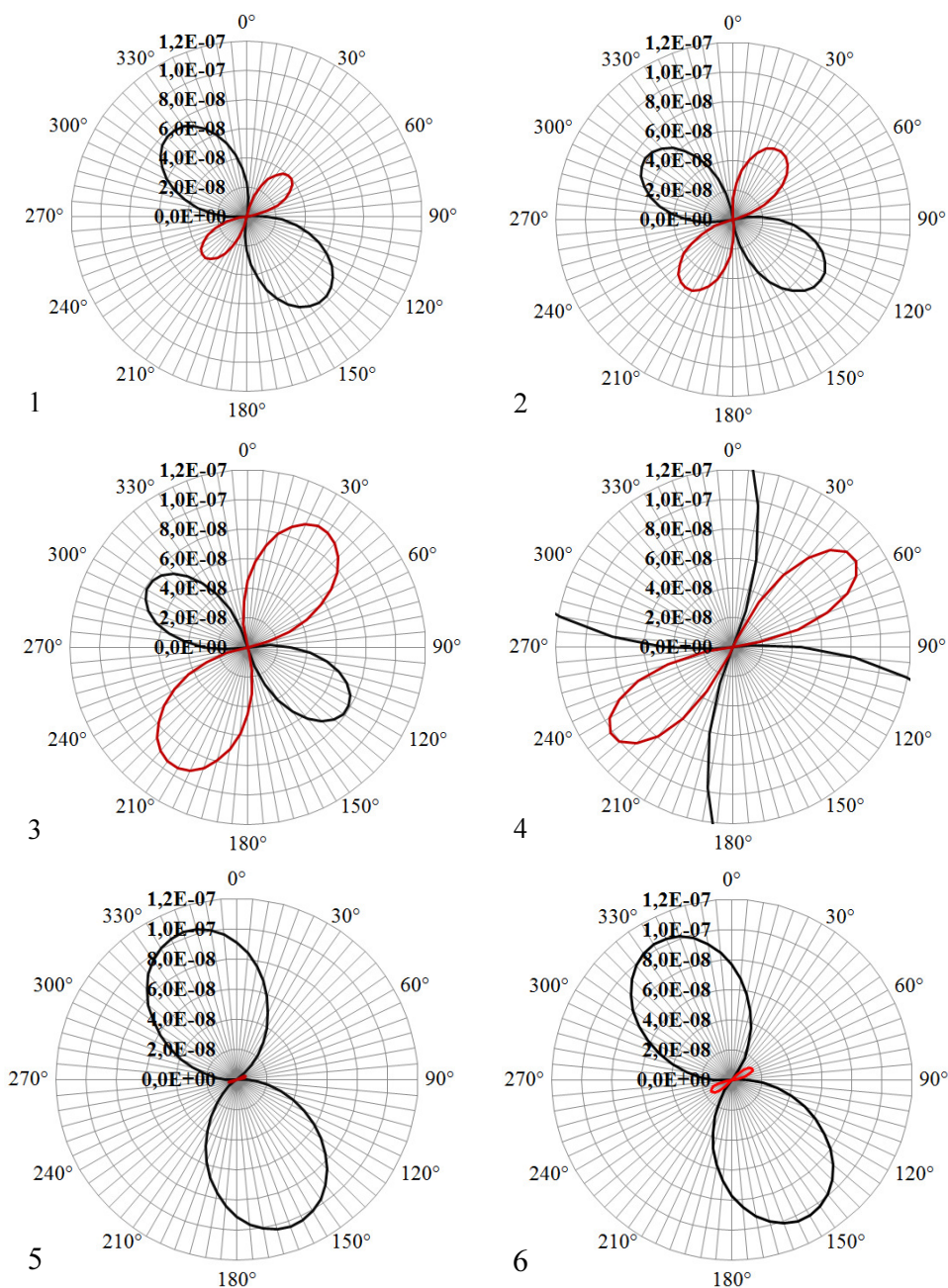
*Pastaba. Tikrosios reikšmės lygios $\Delta \cdot 10^{-8}$.

4.3 pav. Dilatacijos sklaida

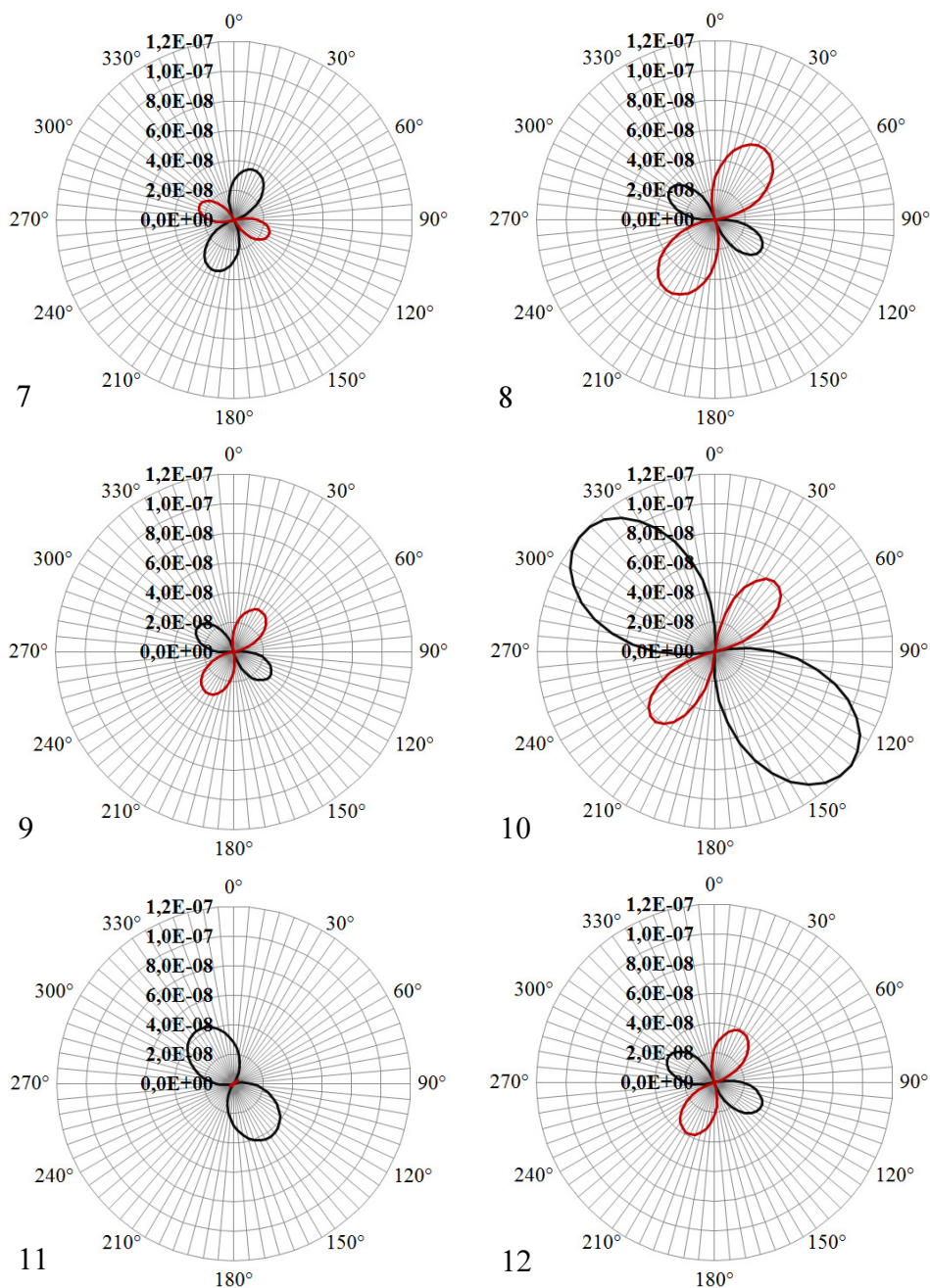
Fig. 4.3. The dispersion of dilatation

Didžiausia dilatacijos reikšmė (4.3 pav.) yra 57°–60° šiaurės platumos ir 20°–25° rytų ilgumos. Maksimali dilatacijos rodiklių reikšmė ($22 \cdot 10^{-8}$) yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos. Nagrinėjamame regione vyrauja teigiamos deformacijos reikšmės, t. y. teritoriją veikia tempimo jėgos.

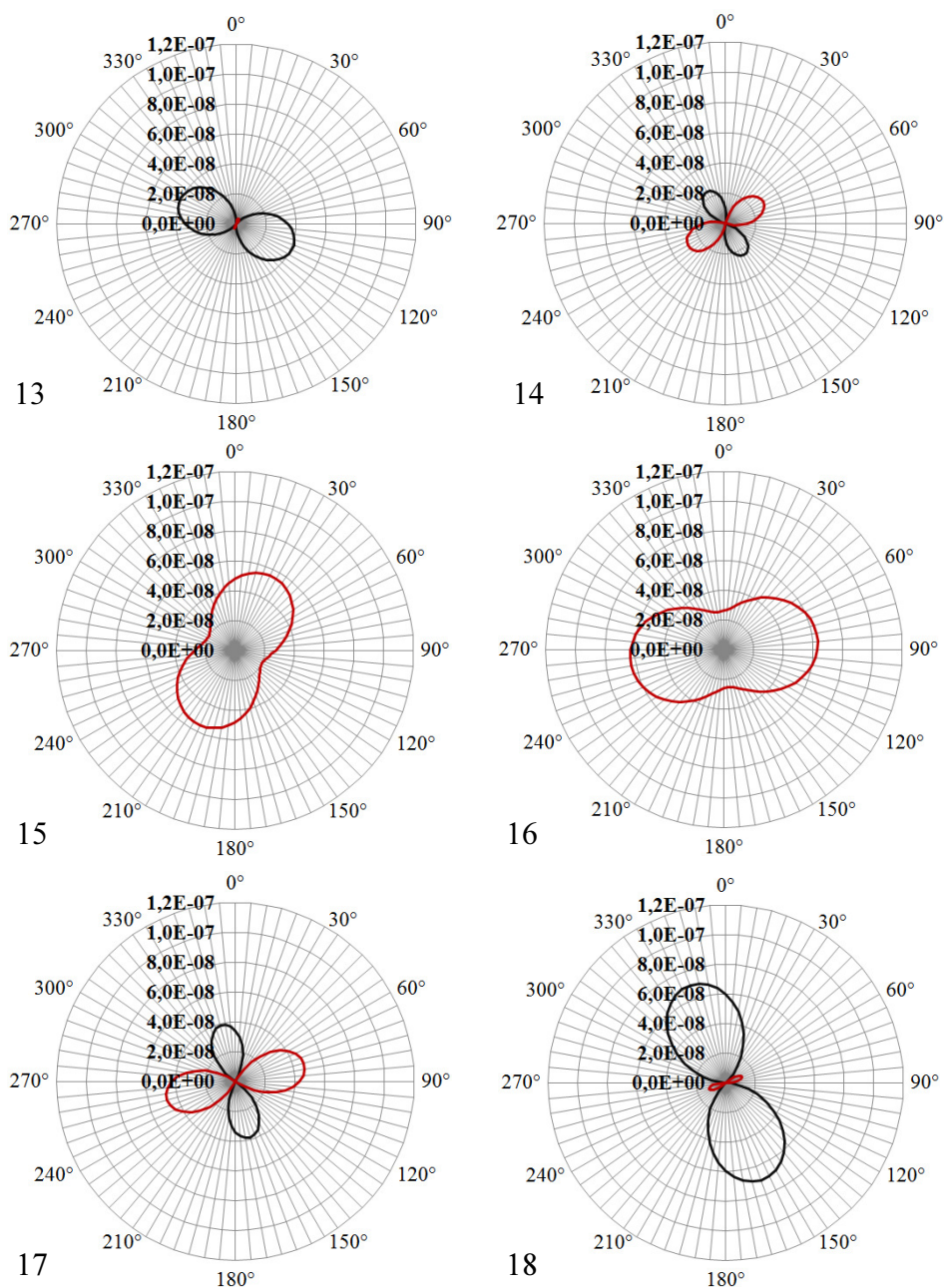
Siekiant kuo vaizdžiau pateikti informaciją apie vyraujančias tiek teigiamų, tiek neigiamų deformacijų kryptis, patogiausias būdas tai pavaizduoti grafiku. Vienas iš informatyviausių ir, bene geriausiai, suteikiančių galimybę greitai vizualinei analizei yra Radar tipo grafikai. Keičiant kryptį kas 5°, nubraižyti visų nagrinėjamų trikampių didžiausiojo bei mažiausiojo santykinio pailgėjimo (3.14 ir 3.16 lentelės) kryptių grafikai (4.4–4.6 pav.).



4.4 pav. Horizontaliųjų deformacijų sklaida (1–6 trikampiai)
Fig. 4.4. The dispersion of horizontal deformation (1–6 triangles)



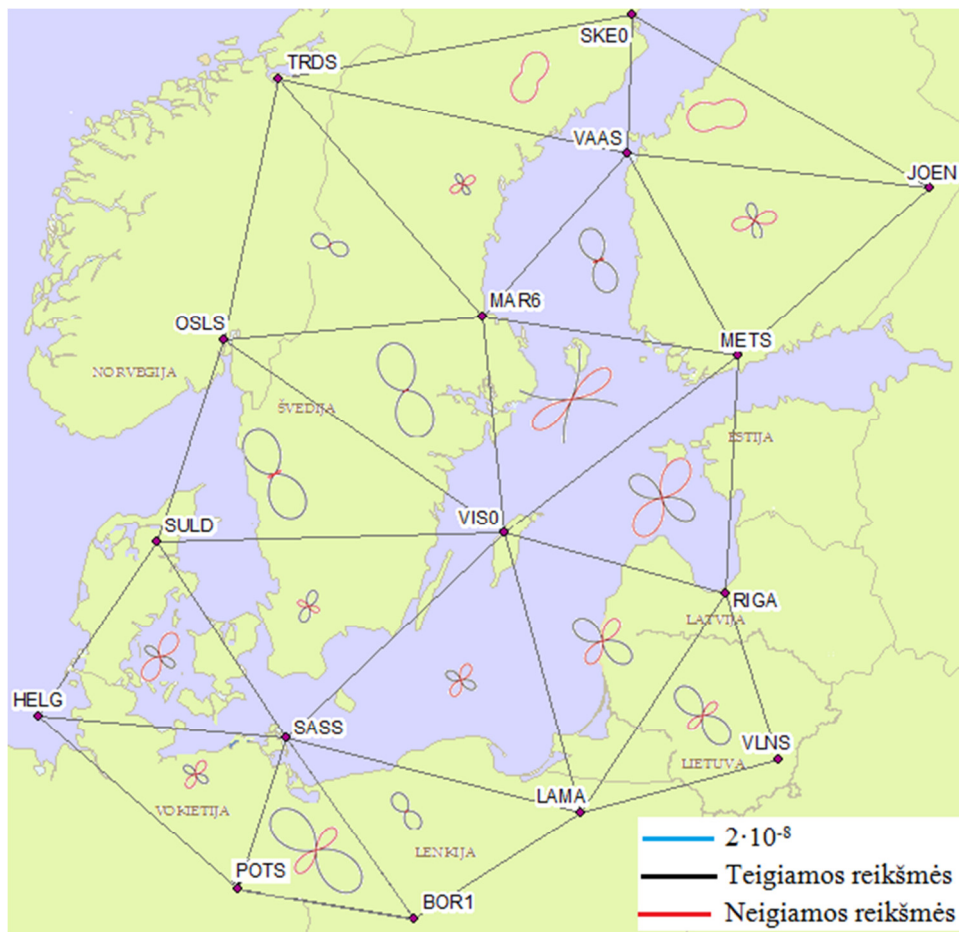
4.5 pav. Horizontaliųjų deformacijų sklaida (7–12 trikampiai)
Fig. 4.5. The dispersion of horizontal deformation (7–12 triangles)



4.6 pav. Horizontaliųjų deformacijų sklaida (13–18 trikampiai)
Fig. 4.6. The dispersion of horizontal deformation (13–18 triangles)

Iš sudarytų grafikų, pateiktų 4.4–4.6 paveiksluose, galime spręsti apie vyraujančių tiek teigiamų, tiek neigiamų deformacijų kryptis bei deformacijų pobūdį bet kuriomis kryptimis.

Pagal nubraižytus santykinius didžiausiojo bei mažiausiojo pailgėjimų krypčių grafikus (4.4–4.6 paveikslai), visoje nagrinėjamoje teritorijoje vyraujančių deformacijų bendras vaizdas pateiktas 4.7 paveiksle.

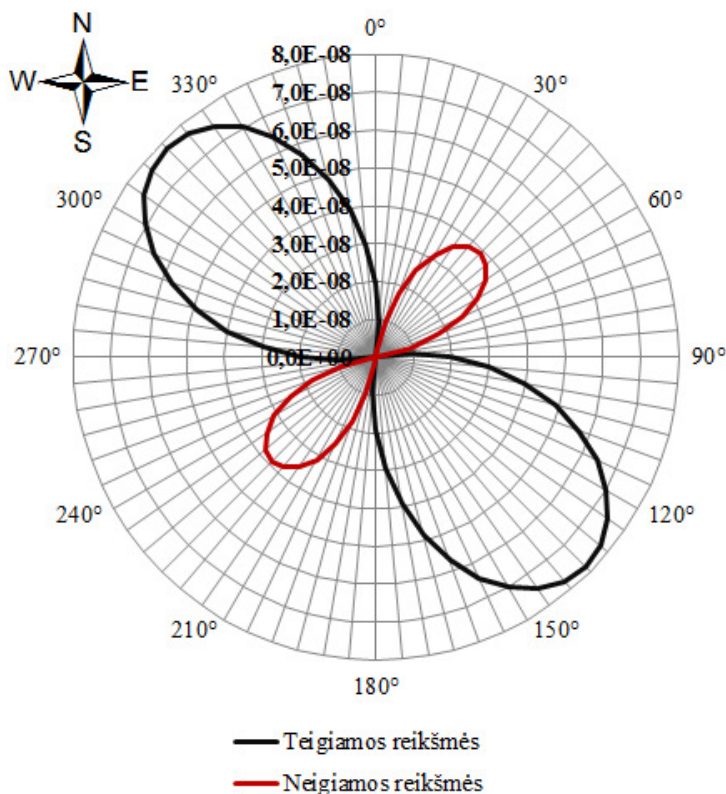


4.7 pav. Horizontaliųjų santykinų deformacijų sklaida
Fig. 4.7. The dispersion of horizontal related deformation

Vyraujančios didžiausiųjų santykinų pailgėjimų kryptys Baltijos regione yra šiaurės vakarų (4.7 pav.). Atkreiptinas dėmesys, kad vieninteliame trikampyje Nr. 7 (SULD–VIS0–SASS) didžiausias santykinis pailgėjimas yra šiaurės rytų kryptimi. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų absoliučiosios

reikšmės didėja einant tiriamojo regiono šiaurės vakarų (šiaurės rytų) kryptimi. Didžiausios reikšmės yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos. Išsiskiriantys anomaliniai reiškiniai yra trikampyje Nr. 4 (MAR6–METS–VIS0). Šiaurinėje nagrinėjamos teritorijos dalyje vyrauja neigiamos deformacijos. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo vyraujančios kryptys yra šiaurės rytų, išskyrus trikampyje Nr. 7 (SULD–VIS0–SASS), kur mažiausiojo santykinio pailgėjimas yra šiaurės vakarų kryptimi.

Apibendrintasis tyrimų regiono didžiausiojo bei mažiausiojo santykinio pailgėjimo krypčių grafikas pateiktas 4.8 paveiksle.

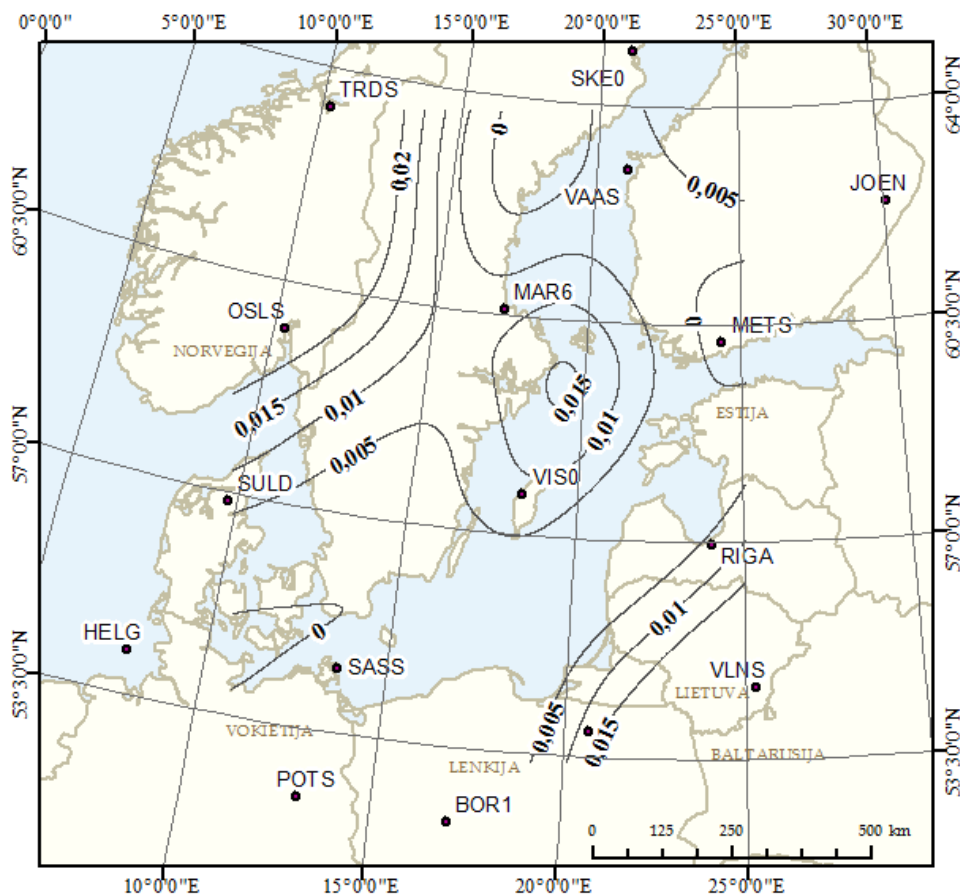


4.8 pav. Apibendrinti horizontaliųjų deformacijų sklaidos rodikliai
Fig. 4.8. The dispersion of generalized horizontal deformation indicators

Kaip matyti pateiktame grafike (4.8 paveikslas) didžiausios teigiamos reikšmės yra ties 135° ir 315° azimutų kryptimis, atitinkamai mažiausios reikšmės yra ties 55° ir 225° azimutų kryptimis. Nagrinėjamojo Baltijos regiono viso struktūrinio bloko teigiamos deformacijos beveik trigubai didesnės negu

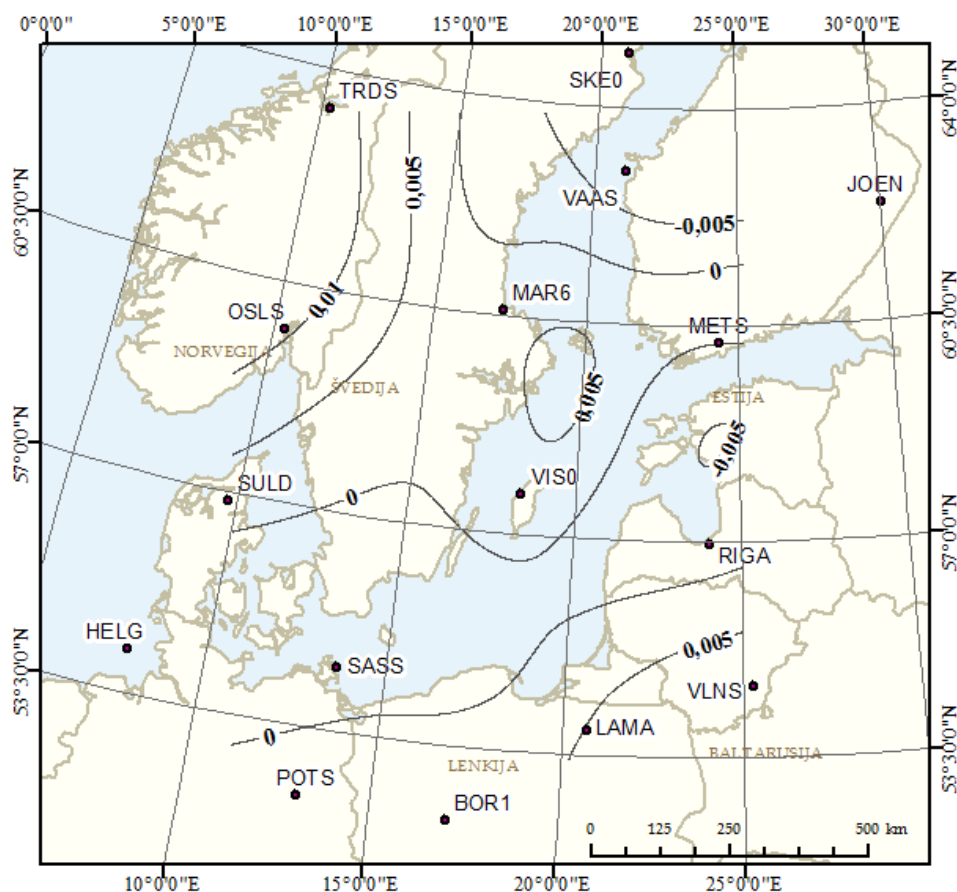
neigiamos deformacijos. Tuo tarpu ties 10° , 80° , 190° ir 260° azimutais yra stebimos minimalios (nulinės) krypčių deformacijos.

Maksimalaus ir minimalaus svarbiausių geodinaminio įtempių sklaidos žemėlapiai pateikti 4.9 ir 4.10 paveiksluose.



4.9 pav. Maksimalaus geodinaminio įtempio sklaida, MPa
Fig. 4.9. The dispersion of maximum geodynamical stresses, MPa

Baltijos regione vyrauja teigiamos svarbiausiojo maksimalaus įtempio reikšmės (4.9 pav.). Intensyvesnė įtempių kaita yra šiaurės vakarinėje nagrinėjamos teritorijos dalyje.



4.10 pav. Mažiausiojo geodinaminio įtempio sklaida, MPa
Fig. 4.10. The dispersion of minimum geodynamical stresses, MPa

Minimalaus svarbiausiojo įtempio reikšmės centrinėje ir šiaurinėje nagrinėjamojo regiono dalyje yra neigiamo ženklo.

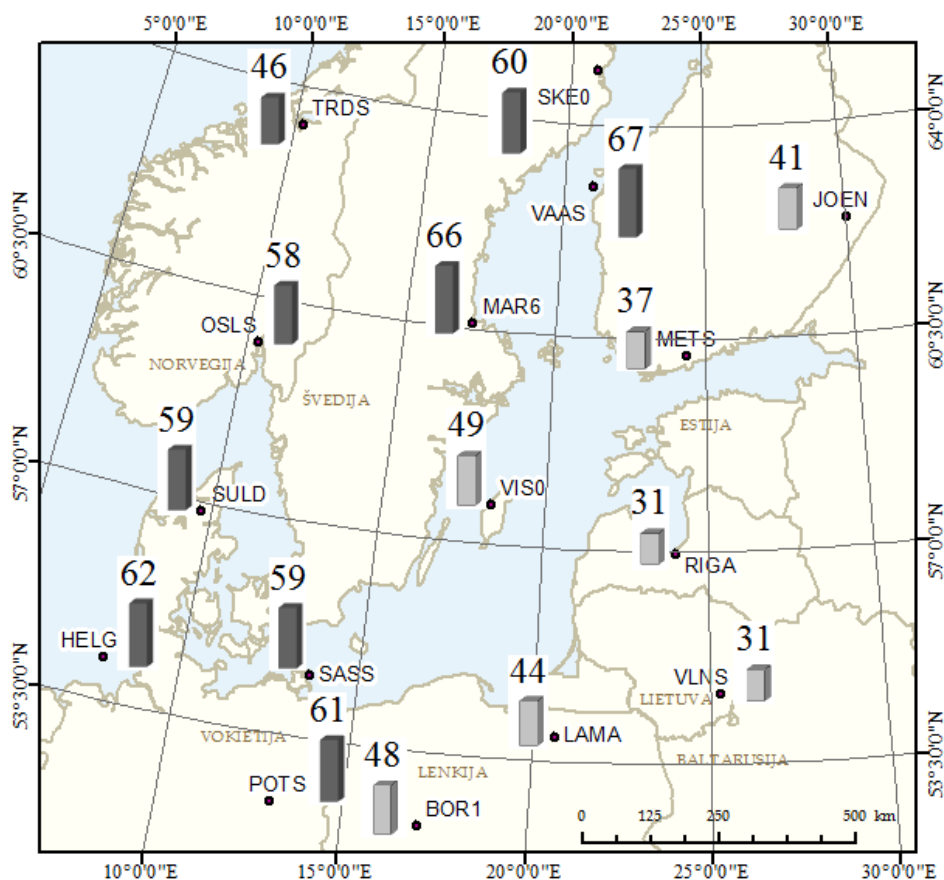
Nagrinėjamame regione vyrauja tempimo įtempiai. Tuo tarpu Baltijos jūra yra veikama tektoninio spaudimo, galimai susijusio su stambiais tektoninėmis zonomis.

Atsižvelgiant į tai, kad tyrimo metu, nagrinėjamojo Baltijos regiono tyrimų arealas buvo išplėstas (3.6 pav.), naujų punktų vieningoje lokaliaje horizontalinėje koordinatų sistemoje koordinatų pokyčiai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Lokaliųjų horizontinių koordinatinių pokyčiai**Table 4.1.** Changes of local horizontal coordinates

Punktas	Koordinatinių pokyčiai, m			Punktas	Koordinatinių pokyčiai, m		
	Δx	Δy	Δz		Δx	Δy	Δz
JOEN	0,0838	0,1818	0,0408	TRDS	0,1155	0,1247	0,0458
VAAS	0,1059	0,1619	0,0670	SKE0	0,1167	0,1578	0,0597

Remiantis 3.7 ir 4.1 lentelėse pateiktais z koordinatinių pokyčiais, kurie sutampa su vertikalųjų Žemės plutos judesių reikšmėmis lokaliajoje horizontalinėje koordinatinių sistemoje. Vertikalūs Žemės plutos judesiai Baltijos regione pateikti 4.11 paveiksle.



*Pastaba. Tikrosios reikšmės išreikštos milimetrais.

4.11 pav. Vertikalieji judesiai (2004–2012 m.)**Fig. 4.11.** Vertical movements (2004–2012)

Vertikaliosios Žemės plutos deformacijos tiriamajame 2004–2012 m. laikotarpyje yra nuo 31 mm iki 67 mm (4.11 pav.). Metiniai kitimo greičiai yra nuo 4 mm/per metus iki 8 mm/per metus. Tuo tarpu C.1 priede pateiktoje lentelėje matyti, kad z koordinačių pokyčių nustatymo vidutinės kvadratinės paklaidos yra iki 4 mm. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad vertikalūs Žemės plutos poslinkiai tiriamajame Baltijos regione nustatyti iš geodezinių matavimų yra patikimi.

Vertikalūs Žemės plutos judesiai pasižymi aiškiai išreikštais dėsningumais. Vakarinėje Baltijos jūros pusėje Žemės plutos kilimas yra didesnis, o rytinėje – mažesnis. Pažymėtina, jog didesnis Žemės plutos judesių kilimas yra šiaurės kryptimi, kiek mažesnis šiaurės rytine kryptimi. Tokia vertikaliųjų judesių diferenciacija tiriamajame regione gali būti susijusi su galimai Baltijos jūrą kertančiu Žemės plutos lūžiu bei bendruoju Fenoskandijos poledynmetiniu kilimu.

4.2. Gautųjų rezultatų palyginimas su kitų tyrėjų duomenimis

Daugiausiai šiaurės vakarinėje Europos dalyje kitų tyrėjų atliekami tyrimai yra Skandinavijos šalyse (Nordman *et al.* 2009; Bergstand *et al.* 2005; Eurobrige ... 1999; Fjeldskaar *et al.* 2000; Nordman 2009; Pan *et al.* 2001; Афанасьев 1999). Atlikti tyrimai rodo, kad Fenoskandijoje tebevyksta litosferos poledynmetinis izostazinis kilimas, kurį iššaukė prieš dešimtį tūkstančių metų nutirpęs ledynas.

Pasauliniame tektoninių įtempių žemėlapyje instrumentinių duomenų apie dabartinį įtempių režimą Baltijos regione yra mažai. Daugiausiai duomenų yra šiaurės vakarinėje teritorijos dalyje (Heidbach, Hühne 2008). Instrumentiniai duomenys rodo, kad Baltijos jūros baseinas yra veikiamas dviejų įtempių provincijų.

Taikant *GPS* matavimų duomenis atlikti tyrimai rytinėje Baltijos jūros pusėje, parodė, kad Baltijos jūra yra veikiamą tempimo tektoninių jėgų (Zakarevičius *et al.* 2008, 2008a, 2010, 2011; Baltijos prekambro ... 2008, 2009). Nustatyta, kad skirtingai nuo vakarinės Baltijos regiono dalies, rytinė dalis yra tektoninio spaudimo zonoje.

Šiaurės vakarinėje Europos dalyje esantis Baltijos regionas yra veikiamas ne tik Viduržemio jūros įtampų provincijos, bet ir regiono vakaruose esančios Šiaurės Atlanto įtampų provincijos (Šliaupa *et al.* 2004). Prognozuojama, kad vakaruose Baltijos regiono teritorija veikiamą ŠV–PR kompresijos (Wu *et al.* 1999), o rytuose Š–P spaudimo (Šliaupa *et al.* 2004).

Skirtingai nei nagrinėjamojo regiono šiaurinėje dalyje, vakarinėje dalyje vyksta Žemės plutos grimzdimas. Nustatyta sąlyginė riba tarp pakilimo ir

nusileidimo Leningrado srityje bei Karelijoje, o šiaurės rytinėje yra ties Ladogos ežeru (Kakkuri, Poutanen 1997).

Šiame darbe nustatyta, jog Baltijos jūros vakarinėje dalyje Žemės plutos vertikaliųjų judesių greičiai yra beveik dvigubai didesni nei rytinėje Baltijos regiono dalyje. Remiantis 3.1–3.3 paveiksluose pateiktais tyrimo rezultatais, nustatyta, kad *EUREF GPS* tinkle punktai METS ir MAR6 kiekvienais metais tolsta vienas nuo kito. Tai koreliuoja su kitų tyrėjų nustatytais duomenimis (Lidberg *et al.* 2010; Scherneck *et al.* 1998, 2001, 2010). Nustatyta santykinį didžiausiojo ir mažiausiojo pailgėjimų šiaurės vakarų kryptis neprieštarauja su (Olaiz *et al.* 2009; Greneczy 2000; Cai 2004; Cai, Grafarend 2005, 2007) darbuose pateiktiems tyrimų rezultatams.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad intensyviausia didžiausiojo santykinio pailgėjimo kaita yra šiaurinėje nagrinėjamo Baltijos regiono teritorijos dalyje. Maksimali horizontaliųjų Žemės plutos didžiausiojo pailgėjimo rodiklių reikšmė yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos. Nagrinėjamoje teritorijoje einant nuo didžiausio santykinio pailgėjimo reikšmės šiaurės vakarine, pietine ir pietrytine kryptimis, rodiklių reikšmės ir jų kaitos greitis mažėja.
2. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmių sklaida intensyvi yra šiaurės rytinėje nagrinėjamo Baltijos regiono teritorijos dalyje. Žymiai mažesnis, tačiau irgi pastebimas, intensyvumas yra ir pietrytinėje teritorijos dalyje. Kitose Baltijos regiono teritorijos dalyje mažiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmių kaita ne tokia intensyvi.
3. Baltijos regione vyraujančios didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptys yra šiaurės vakarų. Didžiausios reikšmės yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos ($22 \cdot 10^{-8}$).
4. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo vyraujančios kryptys yra šiaurės rytų, išskyrus baigtiniame elemente Nr. 7 (SULD–VIS0–SASS), kuriame mažiausiasis santykinis pailgėjimas yra šiaurės vakarų kryptimi.
5. Nagrinėjamojo Baltijos regiono, kaip struktūrinio bloko, apibendrintųjų teigiamų deformacijų reikšmės beveik trigubai didesnės negu neigiamų deformacijų. Didžiausios teigiamos reikšmės yra ties 135° ir 315° azimutų kryptimis, atitinkamai mažiausios reikšmės yra ties 55° ir 225° azimutų kryptimis. Ties 10° , 80° , 190° ir 260° azimutais yra minimalios (nulinės) krypčių deformacijos.

6. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių kitimas Baltijos regione 2004–2012 m. laikotarpyje yra nuo 31 mm iki 67 mm, t. y. metiniai kitimo greičiai yra nuo 4 mm/per metus iki 8 mm/per metus.
7. Vakarinėje Baltijos jūros pusėje Žemės plutos kilimas yra didesnis, o rytinėje – mažesnis. Didesnis Žemės plutos judesių kilimas yra regiono šiaurinėje dalyje, kiek mažesnis einant šiaurės rytine kryptimi. Tokia vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaita gali būti susijusi su galimai Baltijos jūrą kertančiu Žemės plutos lūžiu bei bendruoju Fenoskandijos poledynmetiniu kilimu.

Bendrosios išvados

Remiantis disertaciniame darbe atliktais tyrimais, gautos šios apibendrintos išvados:

1. Baltijos regione horizontaliųjų Žemės plutos didžiausiojo santykinio pailgėjimo 2004–2012 m. laikotarpyje reikšmės baigtiniuose elementuose yra nuo $1,675 \cdot 10^{-8}$ iki $22,587 \cdot 10^{-8}$, mažiausiojo santykinio pailgėjimo – nuo $-6,211 \cdot 10^{-8}$ iki $6,539 \cdot 10^{-8}$, dilatacijos – nuo $-2,090 \cdot 10^{-8}$ iki $21,624 \cdot 10^{-8}$.

2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių ir jų vidutinių kvadratinių paklaidų santykis siekia 15,59, todėl galima teigti, kad nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių reikšmės yra patikimos ir atspindi tikrąsias teritorijos dabartines geodinaminio aktyvumo charakteristikas.

3. Didžiausieji santykiniai pailgėjimai yra šiaurės vakarų, o mažiausieji – šiaurės rytų kryptimis. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų absoliučiosios reikšmės didėja einant tiriamojo regiono šiaurės vakarų (šiaurės rytų) kryptimi. Didžiausiosios reikšmės yra ties 59° šiaurės platumos ir 20° rytų ilgumos.

4. Apibendrintoji viso tyrimų regiono didžiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmė yra $7,812 \cdot 10^{-8}$, mažiausiojo santykinio pailgėjimo yra $-3,891 \cdot 10^{-8}$, dilatacijos – $3,921 \cdot 10^{-8}$. Viso struktūrinio bloko posūkis yra -44° .

5. Su Žemės plutos horizontaliaisiais judesiais susiję svarbiausieji įtempiaai baigtiniuose elementuose didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimis kinta nuo 0,0028 MPa iki 0,0230 MPa, o mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi –

nuo $-0,0170$ MPa iki $0,0082$ MPa. Spaudimo jėgos tiriamojo regiono Žemės pluta veikia iš pietvakarių ir šiaurės rytų.

6. Vertikaliosios Žemės plutos deformacijos tiriamajame 2004–2012 m. laikotarpyje yra nuo 31 mm iki 67 mm. Jų metiniai kitimo greičiai yra apie 4 mm/per metus iki 8 mm/per metus.

7. Vertikalūs Žemės plutos judesiai pasižymi aiškiai išreikštais dėsningumais. Vakarinėje Baltijos jūros pusėje Žemės plutos kilimas yra didesnis, o rytinėje – mažesnis. Atkreiptinas dėmesys, jog didesnis Žemės plutos judesių kilimas yra šiaurės kryptimi. Tokia vertikalųjų judesių diferenciacija tiriamajame regione gali būti susijusi su galimai Baltijos jūrą kertančiu Žemės plutos lūžiu bei bendruoju Žemės plutos poledynmetiniu kilimu Fenoskandijoje.

8. Palyginus gautuosius tyrimų rezultatus su kitų tyrėjų duomenimis, galima teigti, kad nustatytų Žemės plutos deformacijų reikšmės ir sklaidos ypatumai neprieštaruoja gretimose teritorijose atliktiems tyrimų duomenims ir papildo kitų autorių tyrimo rezultatus.

Literatūra ir šaltiniai

- Aalto, J.; Salonen, E. M. 1976. Determination of movements in the Earth's crust by finite element method. *Geophysica*, 14(1): 147–163.
- Abolghasem, A. M.; Grafarend, E. W. 2003. Finite element analysis of quasi-static earthquake displacement fields observed by GPS. *Journal of Geodesy*, 77(9): 529–536.
- Aksamitauskas, Č.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2006. Modelling of strains and stresses of the Earth-crust in the zones of ecologically dangerous objects. In *LAG Symposium "Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles"*: Selected papers, 131: 233–238.
- Allmendinger, R. W.; Reilinger, R.; Loveless, J. 2007. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. *Tectonics*, 26(3): doi:10.1029/2006TC002030.
- Altiner, Y. 2001. The contribution of GPS data to the detection of the Earth's crust deformations illustrated by GPS campaigns in the Adria region. *Geophysical Journal International*, 145(2): 550–559.
- Amato, A.; Montone, P. 1997. Present-day stress field and active tectonics in the southern peninsular Italy. *Geophysical Journal International*, 130(2): 519–534.
- Anikėnienė, A. 2008. Dabartinių vertikalųjų Žemės plutos judesių tyrimas ir modeliavimas taikant geodezinius matavimus (Lietuvos teritorijos pavyzdžiu). Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 126 p. ISBN 978-9955-28-375-1.
- Antonio Sniderio-Pelegrinio 1858 m. iliustracija. Prieiga per internetą [žiūrėta 2012-08-25]: http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Intro_Plate_tectonics.html.
- Arciniega, R. A.; Reddy, J. N. 2007. Tensor-based finite element formulation for geometrically nonlinear analysis of shell structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(1–4): 1048–1073.

- Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. 2004. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vilnius: Technika. 528 p. ISBN 9986-05-793-0.
- Bada, G.; Cloetingh, S.; Gerner, P.; Horváth, F. 1998. Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. *Geophysical Journal International*, 134(1):87–101.
- Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika. 612 p. ISBN 9986-05-792-2.
- Barba, S.; Carafa, M. M. C.; Mariucci, M. T.; Montone, P.; Pierdominici, S. 2010. Present-day stress-field modelling of southern Italy constrained by stress and GPS data. *Tectonophysics*, 482: 193–204.
- Baušys, R.; Dundulis, G.; Kačianauskas, R.; Markauskas, D.; Rimkevičius, S.; Stupak, E.; Stupak, S.; Šliaupa, S. 2008. Sensitivity of dynamic behavior of the FE model: case study for the Ignalina NPP reactor building. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(2): 121–129.
- Bergstrand, S.; Scherneck, H.-G.; Milne, G. A.; Johansson, J. M. 2005 Upper mantle viscosity from continuous GPS baselines in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 39: 91–109.
- Bird, P. 1999. Thin-plane and thin-shell finite-element programs for forward dynamic modeling of plane deformation and faulting. *Computers & Geosciences*, 25: 383–394.
- Cai, A. 2004. Statistical Inference of the Eigenspace Components of a Symmetric Random Deformation Tensor. Doctoral dissertation. München. 139 p. ISBN 3-7696-5016-6.
- Cai, J.; Grafarend, E. W. 2007. Statistical analysis of geodetic deformation (strain rates) derived from the space geodetic measurements of BIFROST Project in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 43: 214–238.
- Cai, J.; Grafarend, E. W.; Schaffrin, B. 2005. Statistical inference of the eigenspace components of a two-dimensional, symmetric rank-two random tensor. *Journal of Geodesy*, 78(7–8): 425–436.
- Calais, E.; Galisson, L.; Stéphan, J.-F.; Delteil, J.; Deverchère, J.; Larroque, C.; Mercier de Lépinay, B.; Popoff, M.; Sosson, M. 2000. Crustal strain in the Southern Alps, France, 1948–1998. *Tectonophysics*, 319(1): 1–17.
- Caparoli, A. et al. 2008. Geokinematics of Central Europe: New insights from the CERGOP-2/Environmental Project. *Journal of Geodynamics*, 45(4–5): 246–256.
- Caporali, A.; Martin, S.; Massironi, M. 2003. Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS network – II. Strain rate versus seismicity and structural geology. *Geophysical Journal International*, 155(3): 254–268.
- Cerveira, P. J. M.; Heinkelmann, R.; Boehm, J.; Weber, R.; Schuh, H. 2006. Contributions of GPS and VLBI for understanding station motions. *Journal of Geodynamics*, 41: 87–93.
- Chang, C. P.; Chang, T.Y.; Angelier, J.; Kao, H.; Lee, J. C.; Yu, S. B. 2003. Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1–2): 115–127.
- Chery, J. 2008. Geodetic strain across the San Andreas fault reflects elastic plane thickness variations (rather than fault slip rate). *Earth and Planetary Science Letters*, 269: 352–365.
- Ching, K.-E.; Rau, R.-J.; Lee, J.-C.; Hu, J.-C. 2007. Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 601–619.
- Clarke, P. J.; Davies, R. R.; England, P. C.; Parsons, B.; Billiris, H.; Paradissis, D.; Veis, G.; Cross, P. A.; Denys, P. H.; Ashkenazi, V.; Bingley, R.; Kahle, H.-G.; Muller, M.-V.; Briole, P. 1998. Crustal strain in central Greece from repeated GPS measurements in the interval 1989–1997. *Geophysical Journal International*, 135(1): 195–214.
- Coda, H. B.; Paccola, R. R. 2008. A positional FEM Formulation for geometrical non-linear analysis of shells. *Latin America Journal of Solids and Structures*, 5: 205–223.

- Cong, D. C.; Feigl, K. L. 1999. Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam, 1963–1994. *Journal of Geodesy*, 73(6): 298–310.
- Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2006. *Statistika ir jos taikymai I*. Vilnius: TEV leidykla, 240 p. ISBN 9986-546-93-1.
- Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2008. *Statistika ir jos taikymai II*. Vilnius: TEV leidykla, 272 p. ISBN 9955-491-16-7.
- Česnauskienė, J. 2002. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognozės Holto metodu galimybės. *Geodezija ir kartografija*, 28(2): 49–53.
- Česnauskienė, J.; Aleknienė, E. 2001. Adaptyvinis žemės paviršiaus judesių modelis Ignalinos AE geodinaminio poligono šiaurinėje dalyje. *Geodezija ir kartografija*, 27(2): 74–80.
- Dermanis, A. 1981. Geodetic estimability of crustal deformations parameters. *Quaterniones Geodaesiae*, 2(2): 159–169.
- Dermanis, A. 2009. The Evolution of geodetic methods for the determination of strain parameters for earth crust deformation. *Publication of the School of Rural & Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki*, 107–144.
- Dermanis, A. 2011. Fundamentals of surface deformation and application to construction monitoring. *Applied Geomatics*, 3(1), 9–22.
- Dixon, T. H.; Miller, M.; Farina, F.; Wang, H.; Johnson, D. 2000. Present-day motion of the Sierra Nevada block and some tectonic implications for the Basin and Range province, North American Cordillera. *Tectonics*, 19: 1–24.
- Dyksterhuis, S.; Albert, R. A.; Müller, R. D. 2005. Finite-element modelling of contemporary and paleointraplate stress using ABAQUS™. *Computers and Geosciences*: 31: 297–307.
- Dragert, H. 1999. Tectonic deformation in western Washington from continuous GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, 26(20): 3153–3156.
- Dragert, H.; Chen, X.; Kouba, J. 1995. GPS monitoring of crustal strain in southwest British Columbia with the Western Canada Deformation Array. *Geomatica*, 49: 301–313.
- Ekman, M. 1991. A concise history of postglacial land uplift research (from its beginning to 1950). *Terra Nova*, 3: 358–365.
- El-Fiky, G. 2005. GPS-derived Velocity and Crustal Strain Field in the Suez-Sinai Area, Egypt, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 80: 73–86.
- El-Fiky, G. S. 2000. Elastic and inelastic strains in the Japanese Islands deduced from GPS dense array, *Earth Planets Space*, 52: 1107–1112.
- El-Fiky, G. S.; Kato, T. 1999. Continuous distribution of the horizontal strain in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation. *Journal of Geodynamics*, 27(2): 213–236.
- El-Fiky, G. S.; Kato, T.; Oware, E. N. 1999. Crustal deformation and interplate coupling in the Shikoku district, Japan, as seen from continuous GPS observation. *Tectonophysics*, 314: 387–399.
- Erdoğan, S.; Şahin, M.; Tiryakioğlu, I.; Güllal, E.; Telli, A. K. 2009. GPS Velocity and Strain Rate Fields in Southwest Anatolia from Repeated GPS Measurements. *Sensors*, 9: 2017–2034.
- EUROBRIDGE Seismic Working Group. 1999. Seismic velocity structure across the Fennoscandia-Sarmatia suture of the East European Craton beneath the EUROBRIDGE profile through
- Fjeldskaar, W.; Lindholm, C.; John, F.; Dehls, J. F.; Fjeldskaar, I. 2000. Postglacial uplift, neotectonics and seismicity in Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews*, 19(14–15): 1413–1422.
- Gailius, R.; Grigelis, A.; Jankauskas, T.; Juodkazis, V.; Juozapavičius, G.; Kadūnas, V.; Katinas, V.; Klimas, A. A.; Kondratas, A.; Kondratienė, O.; Linčius, A.; Mikalauskas, V.; Narbutas, V.; Paškevičius, J.; Sakalauskas, K.; Suveizdis, P.; Tarvydas, R.; Vonsavičius, V. 1994. Lietuvos geologija. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla. 448 p. ISBN 5-420-01040-2.

- Gordeev, E. I.; Gusev, A. A.; Levin, V. E.; Bakhtiarov, V. F.; Pavlov, V. M.; Chebrov, V. N.; Kasahara, M. 2001. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia–Pacific–North America plate junction from GPS data. *Geophysical Journal International*, 147(1): 189–198.
- Grafarend, E. W.; Voosoghi, B. 2003. Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets). *Journal of Geodesy*, 77(5–6): 303–326.
- Gręnczy, G. 2000. Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105: 21,835–21,846.
- Hackl, M.; Malservisi, R.; Wdowinski, S. 2009. Strain rate patterns from dense GPS networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1177–1187.
- Heidbach, O.; Höhne, J. 2008. CASMI – A visualization tool for the World Stress Map database. *Computers & Geosciences*, 34: 783–791.
- Henry, P.; Mazzotti, S.; Le Pichon, X. 2001. Transient and permanent deformation of central Japan estimated by GPS: 1. Interseismic loading and subduction kinematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 443–453.
- Hidekuni, K.; Hidemi, M. I.; Akio, Y. 2003. Strain and stress changes in the Tokai region of central Japan expected from a 3D subduction model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 135: 231–252.
- Hoeven, A. G. A.; Mocanu, V.; Spakman, W.; Nutto, M.; Nuckelt, A.; Matenco, L.; Muntcanu, L.; Marcu, C.; Ambrosius, B. A. C. 2005. Observation of present-day tectonic motions in Southeastern Carpatians: Results of the ISES/CRC-461 GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 239: 177–184.
- Hori, M. 2003. Stress inversion method for predicting local stress distribution of body in two-dimensional state of plane stress or strain. *Mechanics of Materials*, 35(3–6): 395–406.
- Hori, M.; Iinuma, T.; Kato, T. 2008. Stress inversion method and analysis of GPS array data. *Comptes Rendus Mecanique*, 336: 132–148.
- Hori, M.; Kameda, T.; Kato, T. 2000. Prediction of stress field in Japan using GPS network data. *Earth Planets and Space*, 52(11): 1101–1105.
- Hori, M.; Kameda, T.; Kato, T. 2001. Application of the inversion method to a GPS network for estimating the stress increment in Japan. *Geophysical Journal International*, 144(3): 597–608.
- Hsu, Y.-J.; Simons, M.; Yu, S.-B.; Kuo, L.-C.; Chen, H.-Y. 2003. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3–4): 287–294.
- Hsu, R.; Li, S. 2004. Decomposition of deformation primitives of horizontal geodetic networks: application to Taiwan's GPS network. *Journal of Geodesy*, 78: 251–262.
- Hughes, T. J. R. 2000. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications, Inc. 682 p.
- Ilgintė, V. 1998a. Lietuvos seismiška aktyvios tektoninės zonos. *Geologija*, 23: 61–64.
- Ilgintė, V. 1998b. Lietuvos seismotektoninis aktyvumas. Daktaro disertacijos santrauka. Vilnius: Geologijos institutas. 40 p.
- Yang, S.-M.; Wang, Q.; You, X.-Z. 2005. Numerical analysis of contemporary horizontal tectonic deformation fields of China from GPS data. *Acta Seismologica Sinica*, 18(2): 135–146.
- Ye, Z.-R.; Wang, J. 2004. Dynamics of present-day crustal movement in the China mainland. *Acta Geophysica Sinica*, 47(3): 456–461.
- Yu, S. B.; Chen, H. Y.; Kuo, L. C. 1993. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274(1–3): 41–59.

- Jekeli, C. 2004. *Geometric Reference System in Geodesy*. USA, Ohio State University. 202 p.
- Jin, S.; Park, P.-H. 2007a. Crustal stress and strain energy density rates in South Korea deduced from GPS observations. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(1): 1–10.
- Jin, S.; Park, P.-H. 2007b. Tectonic activities and deformation in South Korea constrained by GPS observations. *International Journal of Geology*, 2(1): 11–15.
- Jouanne, F.; Genaudeau, N.; Ménard, G.; Darmendrail, X. 1998. Estimating present-day displacement fields and tectonic deformation in active mountain belts: an example from the Chartrouse Massif and the southern Jura Mountains, western Alps. *Tectonophysics*, 296(3–4): 403–419.
- Jouanne, F.; Hippolyte, J. C.; Gamond, J. F.; Martinod, J. 2001. Current deformation of the Digne Nappe (southwestern Alps) from a comparison between triangulation and GPS data. *Geophysical Journal International*, 144(2): 432–440.
- Kačianauskas, R. 1997. *Ivadas į tenzorinį skaičiavimą*. Vilnius: Technika. 72 p.
- Kahle, H.-G.; Müller, M. V.; Geiger, A.; Danuser, G.; Mueller, S.; Veis, G.; Billiris, H.; Paradissis, D. 1995. The strain field in northwestern Greece and the Ionian Islands: results inferred from GPS measurements. *Tectonophysics*, 249(1–2): 41–52.
- Kahle, H.-G.; Straub, C.; Reilinger, R.; McClusky, S.; King, R.; Hurst, K.; Veis, G.; Kastens, K.; Cross, P. 1998. The strain rate field in the eastern Mediterranean region, estimated by repeated GPS measurements. *Tectonophysics*, 294(3–4): 237–252.
- Kaiser, A.; Reicherter, K.; Hübscher, C.; Gajewski, D. 2005. Variation of the present-day stress field within the North German Basin – insights from thin shell FE modeling based on residual GPS velocities. *Tectonophysics*, 397(1–2): 55–72.
- Kakkuri, J.; Poutanen, M. Geodetic determination of surface topography of the Baltic sea. *Marine Geodesy*, 20(4): 1–10.
- Kazakevičius, S.; Petrulytė, E.; Stepanovienė, J. 1997. Lietuvos teritorijos trianguliacijos tinklai. Istorija ir dabartis. *Geodezija ir kartografija*, 25(1): 18–52.
- Kazakevičius, S.; Stepanovienė, J. 1994. Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono niveliacija. *Geodezijos darbai*, 19: 56–65.
- Kenyeres, A.; Bruyninx, C. 2004. EPN coordinate time series monitoring for reference frame maintenance. *GPS solutions*, 8(4): 200–209.
- Khazaradze, G.; Qamar, A.; Dragert, H. 1999. Tectonic deformation in western Washington from continuous GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, 26: 3153–3156.
- Kiamehr, R.; Sjöberg, L. E. 2005. Analysis of surface deformation patterns using 3D finite element method: A case study in the Skåne area, Sweden. *Journal of Geodynamics*, 39(4): 403–412.
- Kiratzi, A. A. 2002. Stress tensor inversions along the westernmost North Anatolian Fault Zone and its continuation into the North Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 151(2): 360–376.
- Kontinentų dreifas. Prieiga per internetą [žiūrėta 2011-04-14]: <http://geology.com/pangea.htm>.
- Krakiwsky, E. J.; Wells, D. E. 1971. *Coordinate systems in geodesy*. Canada, University of New Brunswick. 113 p.
- Kuroki, H.; Ito, H. M.; Yoshida, A. 2002. A three-dimensional simulation of crustal deformation accompanied by subduction in the Tokai region, central Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132(1–3): 39–58.
- Kuroki, H.; Ito, H. M.; Yoshida, A. 2003. Strain and stress changes in the Tokai region of central Japan expected from a 3D subduction model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 135: 231–252.

- Lazauskienė, J.; Janutytė, I. 2011. Seismologinis monitoringas Lietuvoje. Projekto „Geologinės aplinkos monitoringo pajėgumų stiprinimas“ Nr. VP3-1.4-AM-07-V-01-009 veiklų viešinimo renginys „Geologinės aplinkos monitoringo plėtra – platesnis rezultatų apdorojimas“, įvykęs 2011 m. birželio 21–22 d., Platiuose: 9.
- Lesne, O.; Calais, E.; Deverchère, J. 1998. Finite element modelling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active–passive rifting debate. *Tectonophysics*, 289(4): 327–340.
- Lidberg, M.; Johansson, J. M.; Scherneck, H.-G.; Milned, G. A. 2010. Recent results based on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST. *Journal of Geodynamics*, 50: 8–18.
- Liesis, I. 1962. Dabartiniai Žemės plutos vertikalieji judesiai Pietrytiniame Pabaltije. *Geografinis metraštis*, 5: 214–320.
- Lietuvos Respublikos nutarimas „Dėl Lietuvos seisminių sąlygų įvertinimo 2007–2010 metų programos patvirtinimo“. *Valstybės žinios*, 2006-09-28, Nr. 104–3970.
- Baltijos prekambro struktūra ir jos įtaka dabartinei aplinkai ir procesams: reljefo ir paviršinių dinaminių procesų sąryšis su šiuolaikiniais giluminiais geodinaminiais procesais Baltijos jūros regione. Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas; VGTU. Mokslo darbų ataskaita, 2008.
- Baltijos prekambro struktūra ir jos įtaka dabartinei aplinkai ir procesams. Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas; VGTU. Mokslo darbų ataskaita, 2009.
- Litvin, F. L.; Fuentes, A. 2004. *Gear Geometry and Applied Theory*. USA, Cambridge University Press. 816 p. ISBN 978-0521-81-516-8.
- Lowry, A. R.; Hamburger, M. W.; Meertens, C. M.; Ramos, E. G. 2001. GPS monitoring of crustal deformation at Taal Volcano, Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105(1–2): 35–47.
- Lukhnev, A. V.; Sankov, V. A.; Miroshnichenko, A. I.; Ashurkov, S. V.; Calais, E. 2010. GPS rotation and strain rates in the Baikal–Mongolia region. *Russian Geology and Geophysics*, 51: 785–793.
- Lund, B.; Townend, J. 2007. Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge tectonic stress tensor. *Geophysical Journal International*, 170(3): 1328–1335.
- Mahmoud, S. M. 2003. Seismicity and GPS-derived deformation in Egypt. *Journal of Geodynamics*, 35(3): 333–352.
- Mäkinen, J.; Koivula, H.; Poutanen, M.; Saaranen, V. 2003. Vertical velocities in Finland from permanent GPS networks and from repeated precise levelling. *Journal of Geodynamics*, 35(4–5): 443–456.
- Mantovani, E.; Viti, M.; Albarello, D.; Tamburelli, C.; Babbucci, D.; Cenni, N. 2000. Role of kinematically induced horizontal forces in Mediterranean tectonics: insights from numerical modeling. *Journal of Geodynamics*, Vol 30(3): 287–320.
- Marcinkevičius, V.; Laškovas, J. 1996. Ignalinos atominės elektrinės rajono tektoninės sąlygos. *Geologijos akiračiai*, 1–2: 8–23.
- Nakasone, Y.; Yoshimoto, S.; Stolarski, T. A. 2006. Engineering analysis with ANSYS software. Amsterdam: Elsevier, 456 p. ISBN 0-7506-6875-X.
- Nauja atominė elektrinė Lietuvoje (poveikio aplinkai vertinimo ataskaita). 2008 m. spalio 22 d. 269 p.
- Nazarova, L. A.; Nazarov, L. A.; Kuchai, O. A.; Keselman, S. I. 2002. Estimate of stress field variation in the outer crust of the earth using geodetic data. *Journal of Mining Science*, 38: 9–19.
- Nocquet, J. M.; Calais, E. 2003. Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophysical Journal International*, 154(1): 72–88.

- Nocquet, J. M.; Calais, E. 2004. Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3): 661–681.
- Nordman, M.; Männen, J.; Virtanen, H.; Johansson, J. M.; Bilker-Koivula, M.; Virtanen, J. 2009. Crustal loading in vertical GPS time series in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 48: 144–150.
- Olaiz, A. J.; Martín-Munoz, A.; De Vicente, G.; Vegas, R.; Cloetingh, S. 2009. European continuous active tectonic strain–stress map. *Tectonophysics*, 474: 33–40.
- Pačėsa, A.; Šliaupa, A.; Satkūnas, J. 2005. Naujausi Žemės drebėjimai Baltijos regione ir Lietuvos seisminis monitoringas. *Geologija*, 50: 8–18.
- Pan, M.; Sjöberg, L. E.; Talbot, C. J. 2001. Crustal movements in Skåne, Sweden, between 1992 and 1998 as observed by GPS. *Journal of Geodynamics*, 31: 311–322.
- Panafidina, N.; Malkin, Z.; Weber, R. 2006. A new combined European Permanent network station coordinates solution. *Journal of Geodesy*, 80(7): 373–380.
- Papadimitriou, E. E.; Sykes, L. R. 2001. Evolution of the stress field in the northern Aegean Sea (Greece). *Geophysical Journal International*, 146(3): 747–759.
- Parsons, T. 2006. Tectonic stressing in California modeled from GPS observations. *Journal of Geophysical Research*, 105: B03407.
- Petit, C.; Deverchere, J.; Houdry, F. 1996. Present-day stress field along the Baical rift and tectonic implications. *Tectonics*, 15(6): 1171–1191.
- Petroškevičius, P.; Kazakevičius, S.; Kolosovskis, R.; Krikštonis, B.; Putrimas. 1997. Lietuvos valstybinis GPS tinklas. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 26(2): 5–20.
- Petroškevičius, P.; Ramanauskas, R. 1995. Lietuvos valstybinio GPS tinklo sudarymas. *Geodezija ir kartografija*, 21(1): 3–20.
- Pietrantonio, G.; Riguzzi, F. 2004. Three-dimensional strain tensor estimation by GPS observations: methodological aspects and geophysical application. *Journal of Geodynamics*, 38: 1–18.
- Ponray, M.; Miura, S.; Reddy, C. D.; Prajapati, S. K.; Amirtharaj, S.; Mahajan, S. H. 2010. Estimation of strain distribution using GPS measurements in the Kumaun region of Lesser Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 658–667.
- Provost, A. S.; Chéry, J.; Hassani, R. 2003. 3D mechanical modeling of the GPS velocity field along the North Anatolian fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(3–4): 361–377.
- Puglisi, G.; Bonforte, A.; Maugeri, S. R. 2001. Ground deformation patterns on Mount Etna, 1992 to 1994, inferred from GPS data. *Bulletin of Volcanology*, 62(6–7): 371–384.
- Puzienė, R. 2009. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių įtakos niveliacijos tinklams vertinimas. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 166 p. ISBN 978-9955-28-525-0.
- Randjarv, J. 1993. Vertical movements of Earth's crust in the Baltic region. *Reports of the Finnish Geodetic institute, Helsinki* 93(2). 38 p.
- Rao, S. 1999. *The finite element method in engineering*. Third edition. Butterworth–Heinemann, 556 p.
- Reddy, C. D.; El-Fiky, G.; Kato, T.; Shimada, S.; Kumar, K. V. 2000. Crustal strain fields in the Deccan trap region, western India, derived from GPS measurements. *Earth Planets and Space*, 52(11): 965–969.
- Ring of fire. Prieiga per internetą [žiūrėta 2012-08-25]: <http://need-media.smugmug.com>
- Ryan, H. F.; Parsons, T.; Sliter R. W. 2008. Vertical tectonics deformation associated with San Andreas fault zone offshore of San Francisco, California. *Tectonophysics*: 457(3–4): 209–223.

- Rontogianni, S. 2010. Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994–2000. *Journal of Geodynamics*, 50: 381–399.
- Sagiya, T.; Miyazaki, S.; Tada, T. 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11–12): 2303–2322.
- Scherneck, H.-G.; Johansson, J. M.; Vermeer, M.; Davis, J. L.; Milne, G. A.; Mitrovica, J. X. 2001. BIFROST Project: 3-D Crustal Deformation Rates Derived from GPS Confirm Postglacial Rebound in Fennoscandia. *Earth Planets Space*, 53: 703–708.
- Scherneck, H.-G.; Johansson, J. M.; Mitrovica, J. X.; Davis, J. L. 1998a. The BIFROST project: GPS determined 3-D displacement rates in Fennoscandia from 800 days of continuous observations in the SWEPOS network. *Tectonophysics*, Elsevier Science Publishers B. V. 294: 305–321.
- Scherneck, H.-G.; Lidberg, M.; Haas, R.; Johansson, J. M.; Milne, G.A.; 2010c. Fennoscandian strain rates from BIFROST GPS: A gravitating, thick-plate approach. *Journal of Geodynamics* 50(1): 19–26.
- Schneider, D. 1982. Complex crustal strain approximation. *Technical report NO 91*. 223 p.
- Sella, G. F.; Dixon T. H.; Mao, A. 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, *Journal of Geophysical Research*, 107: 2081, doi:10.1029/2000JB000033.
- Serpelloni, E.; Anzidei, M.; Baldi, P.; Casula, G.; Galvani, A.; Pesci, A.; Riguzzi, F. 2001. Geodetic deformations in the central-southern Apennines (Italy) from repeated GPS surveys. *Annali di Geofisica*, 44(3): 627–647.
- Serpelloni, E.; Anzidei, M.; Baldi, P.; Casula, G.; Galvani, A. 2005. Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: new results from analysis of permanent and non-permanent GPS networks. *Geophysical Journal International*, 161(3): 861–880.
- Skeivalas, J. 2008. *GPS tinklų teorija ir praktika*. Vilnius. 288 p. ISBN 978-9955-28-228-0.
- Skeivalas, J.; Paršeliūnas, E.; Ramanauskas, R. 1995. Lietuvos GPS pirmosios klasės tinklo matavimų rezultatų apdorojimas ir išlyginimas. *Geodezija ir kartografija*, 21(1): 21–30.
- Skridlaite, G.; Motuza, G. 2001. Precambrian domains in Lithuania: evidence of terrance tectonics. *Tectonophysics*, 339: 113–133.
- Stanionis, A. 2005. Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone tyrimas geodeziniais metodais. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 124 p.
- Stanionis, A. 2008. Svarbiausiųjų erdvinį Žemės plutos įtempių pokyčių nustatymas pagal GPS matavimų rezultatus. *Geodezija ir kartografija*, 34(2): 71–74.
- Sue, C.; Martinod, P.; Tricart, P.; Thouvenot, F.; Gamond, J-F.; Fréchet, J.; Marinier, D.; Glot, J-P.; Grasso, J-R. 2000. Active deformation in the inner Western Alps inferred from comparison between 1972–classical and 1996–GPS geodetic surveys. *Tectonophysics*, 320(1): 17–29.
- Suito, H.; Iizuka, M.; Hirahara, K. 2002. 3-D viscoelastic FEM modeling of crustal deformation in northeast Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 159(10): 2239–2259.
- Suveizdis, P. 2004. Apie kai kurias šiuolaikiškai sprendžiamas tektonikos problemas. *Geologijos akiračiai*, 2: 37–39.
- Šliaupa, A. 1998. Neotectonic structures of Lithuania and adjacent territories. *Litosfera*, 2: 37–46.
- Šliaupa, A.; Gelumbauskaitė, Ž.; Straumė, J.; Šliaupa, S. 1996. Rytinės Baltijos ir kaimyninių teritorijų neotektoninė schema. *Geologija*, 20: 66–69.
- Šliaupa, S. 1998. Programme of geodynamic monitoring of Lithuania. *Geologijos akiračiai*, 3: 52–59.
- Šliaupa, S. 1999. Establishment of Ignalina GPS geodynamic polygon. *Geological Survey of Lithuania, Annual Report of 1998, Vilnius*: 37–39.

- Šliaupa, S.; Bitinas, A.; Zakarevičius, A. 2005. Predictive model of the vertical movements of the Earth's surface: implications for the land use of the Lithuanian coastal area. In: *33rd Symposium International FESF Strasbourg, Recent Developments in Environmental Protection*, 40: 221–235.
- Šliaupa, S.; Šliaupa, A.; Zakarevičius, A.; Ilginytė, V. 2004. Tektoninių procesų tendencijos neotektotiniame etape ir jų prognozė. *Lietuvos Žemės gelmių raida ir ištekliai. Žurnalo „Litosfera“ leidinys*. 610–613 p.
- Šliaupa, S.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2006. Strain and stress fields of the Ignalina NPP area from GPS data and thin-shell finite element modeling, NE Lithuania, *Geologija*, 56: 27–35.
- Takahashi, H. 2011. Static strain and stress changes in eastern Japan due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, as derived from GPS data. *Earth Planets Space*, 63: 741–744.
- Tesauro, H.; Hollenstein, C.; Egli, R.; Geiger, A.; Kahle, H. G. 2006. Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data. *Journal of Geodynamics*, 42(4–5): 194–209.
- Teza, G.; Pesci, A.; Galgaro, A. 2008. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34: 1142–1153.
- Tyshkov, S. A.; Kuchai, O. A.; Bushenkova, N. A.; Kalmietieva, Z. A. 2008. Current crustal deformation in the northern Tien Shan: GPS and seismological data. *Russian Geology and Geophysics*, 49(4): 280–290.
- Townend, J.; Sherburn, S.; Arnold, R.; Boese, C.; Woods, L. 2012. Three-dimensional variations in present-day tectonic stress along the Australia–Pacific plate boundary in New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 353–354: 47–59.
- Townend, J.; Zoback, M. D. 2004. Regional tectonic stress near San Andreas fault in central and southern California. *Geophysical Research Letters*, 31: L15S11.
- Tsenkov, T.; Gospodinov, S. 2002. Determination of 2D–tectonic deformations using affine transformation. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 127(4): 262–264.
- Tsuji, H.; Hatanaka, Y.; Sagiya, T.; Hashimoto, M. 1995. Coseismic Crustal Deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki Earthquake Monitored by a Nationwide Continuous GPS Array in Japan. *Geophysical Research Letters*, 22(13): 1669–1672.
- Vaniček, P. 1972. Tensors. *Department of Surveying Engineering Lecture Notes 27, University of New Brunswick, Fredericton*. 94 p.
- Vaniček, P.; Grafarend, E. W.; Berber, M. 2007. Strain invariants. *Journal of Geodesy*, 82(4–5): 263–268.
- Vaniček, P.; Krakiwsky, E. J. 1986. *Geodesy: The concepts*. 2nd rev. ed. North–Holland, Amsterdam. 697 p.
- Viganò, A.; Bressan, G.; Ranalli, G.; Martin, S. 2008. Focal mechanism inversion in the Giudicarie–Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insights on tectonic stress and strain. *Tectonophysics*, 460(1–4): 106–115.
- Vigny, C.; Chéry, J.; Duquesnoy, T.; Jouanne, F.; Ammann, J.; Anzidei, M.; Avouac, J. P.; Barlier, F.; Bayer, R.; Briole, P.; Calais, E.; Cotton, F.; Duquenne, F.; Feigl, K. L.; Ferhat, G.; Flouzat, M.; Gamond, J. F.; Geiger, A.; Harmel, A.; Kasser, M.; Laplanche, M.; Le Pape, M.; Martinod, J.; Ménard, G.; Meyer, B.; Ruegg, J. C.; Scheubel, J. M.; Scotti, O.; Vidal, G. 2002. GPS network monitors the Western Alps' deformation over a five-year period: 1993–1998. *Journal of Geodesy*, 76(2): 63–76.
- Vodopivec, F.; Kogoj, D.; Stopar, B. 1993. The use of GPS in the fourth EPOCH measurements of crustal movements along the Ljubljana fault. *Journal of Geodynamics*, 18(1–4): 123–133.
- Wang, J.; Ye, Z.-R. 2005. Dynamic modeling for crustal deformation in China: Comparisons between the theoretical prediction and recent GPS data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 155: 201–207.

- Wang, J.; Ye, Z.-R.; Xe, J.-K. 2008. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field, *Tectonophysics*, 446: 51–60.
- Wiejacz, P. 2004. Preliminary investigation of the September 21, 2004 earthquakes of Kaliningrad Region, Russia. *Acta Geophysica Polonica*, 52: 425–441.
- Williams, T. B.; Kelsey, H. M.; Freymueller, J. T. 2006. GPS-derived strain in northwestern California: Termination of the San Andreas fault system and convergence of the Sierra Nevada–Great Valley block contribute to southern Cascadia forearc contraction. *Tectonophysics*, 413(3–4): 171–184.
- Wu, P.; Johnston, P.; Lambeck, K. 1999. Postglacial rebound and fault instability in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, 139: 657–670.
- Zakarevičius, A. 1994. *Dabartinių vertikalių Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas*. Vilnius. 276 p.
- Zakarevičius, A. 1996a. *Lietuvos geodezinių tinklų koordinačių sistemos ir jų ryšiai*. Vilnius: Technika, 200 p. ISBN 9955-555-03-3.
- Zakarevičius, A. 1996b. Nulinės klasės GPS tinklo deformacijų analizė. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 23(1): 53–61.
- Zakarevičius, A. 1998a. Lietuvos geodezinio tinklo horizontaliosios deformacijos. *Geodezija ir kartografija*, 24(4): 169–178.
- Zakarevičius, A. 1998b. Vertikaliųjų ir horizontaliųjų Žemės plutos judesių sąsajos. *Geodezija ir kartografija*, 24(4): 185–192.
- Zakarevičius, A. 2000a. Erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzorių ir deformacijų rodiklių įvertinimas. *Geodezija ir kartografija*, 26(1): 39–42.
- Zakarevičius, A. 2000b. *Koordinačių sistema LKS 94*. Vilnius: Technika. 62 p.
- Zakarevičius, A. 2002. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir geologinės sandaros sąsajos pietų Lietuvoje. *Geodezija ir kartografija*, 28(2): 29–34.
- Zakarevičius, A. 2003. Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas. Vilnius. 195 p. ISBN 9986-05-691-8.
- Zakarevičius, A.; Buga, A.; Kaminskis, J.; Stanionis, A. 2011. FEM modelling of horizontal tectonic stress pattern in the Baltic region. *Proceedings of the 8th International Conference “Environmental Engineering” Selected papers, 19-20 May, Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Technika, 1516–1521.
- Zakarevičius, A.; Česnauskienė, J. 1995. Vertikalūs Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono šiaurinėje dalyje. *Geodezija ir kartografija*, 21(1): 77–81.
- Zakarevičius, A.; Paršeliūnas, E. K.; Šliaupa, S.; Stanionis, A.; Stephenson, R. 2008. Horizontal deformations of the Earth's crust in the Baltic region from GPS data. *Proceedings of the 7th International Conference “Environmental Engineering” Selected papers, 22–23 May, Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Technika, 1503–1507.
- Zakarevičius, A.; Puzienė, R.; Stanionis, A. 2005. Koordinačių sisteminių paklaidų įtaka Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimams. *Geodezija ir kartografija*, 30(1): 32–37.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2002. Lietuvos geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų sklaidos struktūra. *Geodezija ir kartografija*, 28(4): 117–124.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2003. Horizontaliųjų Žemės plutos Ignalinos atominės elektrinės rajone sklaidos ypatumai. *Geodezija ir kartografija*, 29(4): 119–123.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2003a. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afiniojo koordinačių perskaiciavimo būdu. *Geodezija ir kartografija*, 29(1): 13–19.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2003b. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone sklaidos ypatumai. *Geodezija ir kartografija*, 29(4): 119–123.

- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2004a. Horizontaliųjų Žemės plutos poslinkių ir deformacijų modeliavimas baigtinių elementų metodu. *Geodezija ir kartografija*, 30(2): 35–40.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2004b. Geodinaminių Žemės plutos įtampų pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės regione. *Geodezija ir kartografija*, 30(4): 107–111.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2005. Estimation of horizontal deformations and stresses of the Earth-crust in the Ignalina nuclear power plant area by the finite element method, *Vagos*, 67(20), 1: 103–108.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2005. Žemės plutos horizontaliųjų judesių tyrimas Ansys programa. *Geodezija ir kartografija*, 31(1): 3–7.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2006. Žemės plutos erdviųjų deformacijų nustatymas taikant GPS matavimų duomenis. *Geodezija ir kartografija*, 32(4): 88–91.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2007. Erdviųjų geodinaminių įtempių tyrimas pagal geodezinių matavimų rezultatus. *Geodezija ir kartografija*, 33(1): 21–25.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Šliaupa, S.; Stephenson, R. 2005. Crustal deformations of the GPS polygon of the Ignalina NPP: application of finite element modelling for geodynamic implications. *Proceedings of the 6th International Conference "Environmental Engineering" Selected papers, 19-20 May, Vilnius, Lithuania*. Vol. II. Vilnius: Technika, 1041–1047.
- Zakarevičius, A.; Stepanovienė, J.; Ramanauskas, R. 1994. Vertikalių Žemės paviršiaus judesių Ignalinos atominės elektrinės teritorijoje dispersinė analizė. *Geodezijos darbai*, 19: 101–108.
- Zakarevičius, A.; Šliaupa, S.; Paršeliūnas, E.; Stanionis, A. 2008a. Geodetic network deformation based on GPS data in the Baltic region. *Geodezija ir kartografija*, 34(4): 122–126.
- Zakarevičius, A.; Šliaupa, S.; Stragys, V.-V.; Stanionis, A. 2007. Deformations of the Earth crust in Lithuania and seismic risk for buildings and structures. In *The 9th international conference "Modern building materials, structures and techniques"*: Selected papers, vol. 3. Ed. by M. J. Skibniewski, P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1134–1142.
- Zanutta, A.; Vittuari, L.; Gandolfi, S. 2008. Geodetic GPS-based analysis of recent crustal motions in Victoria Land (Antarctica). *Global and Planetary Change*, 62: 115–131.
- Zhao, S.; Müller, R. D.; Takahashi, Y.; Kaneda, Y. 2004a. 3-D finite-element modelling of deformation and stress associated with faulting: effect of inhomogeneous crustal structures. *Geophysical Journal International*, 157(2): 629–644.
- Zhao, S.; Wu, X.; Hori, T.; Kaneda, Y.; Takemoto, S. 2004b. Crustal deformation and stress localization in Kanto-Tokai, central Japan revealed by GPS. *Geophysical Journal International*, 157(2): 737–752.
- Zhu, S.; Shi, Y. 2011. Estimation of GPS strain rates and its error analysis in the Chinese continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 351–362.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. *The finite element method*. Volume 1, Fifth edition. Butterworth–Heinemann, 2000. 689 p.
- Галаганов О. Н., Горшков В. Л., Гусева Т. В., Розенберг Н. К., Передерин В. П.; Щербакова Н. В. 2010. Современные движения земной коры Ладожско – Онежского региона по данным геодезических измерений. *Структура, свойства, динамика и минералогия литосферы восточно-европейской платформы. XVI международная конференция 20-24 сентября 2010 года . г. Воронеж*. 389 с.
- Гатинский, Ю. Г.; Рундквис, Д. В.; Вladoва, Г. Л.; Прохорова, Т. В.; Романюк, Т. В. 2008. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит. *Бестник Крауни. Хауки о земле*, 11(1): 32–47.
- Гуделис В. 1973. Современные, после и позднеледниковые движение Земной коры Прибалтики. *Современные движения земной коры, Тарту*, 5: 291–301.

Машимов М. М. 1991. *Геодезия. Теоретическая геодезия*. Недра. 268 с. ISBN 5–247–01331–X:0.00.

Современные вертикальные движения земной коры на территории западной половины Европейской части СССР, Труды ЦНИТАиК. 1958. 296 с.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A.; Levinskaitė, D. 2009. Erdvinių Žemės plutos judesių apibendrintųjų charakteristikų nustatymas pagal GPS matavimų duomenis, *Geodesy and Cartography*, 35(4): 126–130. ISSN 2029-6991 (Compendex).

Levinskaitė, D. 2009. Ignalinos atominės elektrinės regiono ekogeodinaminės rizikos vertinimas pagal GPS matavimų duomenis, *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 1(4). Vilnius: Technika, 669-674. ISBN 978-9955-28-385-0 (Index Copernicus).

Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Levinskaitė, D. 2010 Lietuvos teritorijos Žemės plutos deformacijų ir seismotektoninio potencialo ryšys, *Geodesy and Cartography*, 36(4): 139–145. ISSN 1392-1541 (Compendex).

Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Levinskaitė, D. 2012. Investigation of the recent Earth's crust deformations in the territory of Lithuania, *Geodesy and Cartography*, 38(1): 1–8. ISSN 1392-1541 (Compendex).

Levinskaitė, D. 2012. Identification of the spatial position of Permanent GPS stations in the Baltic region, *Aviation*, 16(2): 38–41. ISSN 1648-7788 (Compendex).

Straipsniai kituose leidiniuose

Levinskaitė, D. 2008. Žemės plutos geodinaminių įtempių tyrimas Lietuvos teritorijoje, *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., pranešimų medžiaga: Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, 669–674. ISBN 978-9955-28-385-0.

Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Levinskaitė, D. 2011. The analysis of change of the indications of the horizontal movements of the Earth's crust in the territory of Lithuania. *Proceedings of the 8th International Conference “Environmental Engineering” Selected papers, 19–20 May, Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Technika, 1522–1528.

Priedai

A priedas. Matavimai *EUREF GPS* tinklo stotyse

A.1 lentelė. Matavimai *EUREF GPS* tinklo stotyse

Table A.1. Measurements on *EUREF GPS* network stations

Punk- tas	Metai															
	2012	2011	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996
BYDG	x	x	x													
BOR1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
BORJ	x	x	x	x	x											
BPDL	x	x	x													
BUDP	x	x	x	x	x	x	x	x								
GWWL	x	x	x													
HELG	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
HOBU	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
HOE2	x	x	x	x	x	x										

A.1 lentelės pabaiga

JOEN	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
KIR0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
KIRU	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
KURE	x	x	x													
LAMA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MAR6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
METS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ONSA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
OSLS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
POTS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RIGA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
SASS	x	x	x	x	x	x	x	x								
SKE0	x	x	x	x	x	x	x	x								
SMID	x	x	x	x	x	x	x	x								
SODA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
SPT0	x	x	x	x	x	x	x	x								
SULD	x	x	x	x	x	x	x	x								
SUUR	x	x	x	x	x											
SVTL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
SWK1	x	x	x													
TOIL	x	x														
TORA	x	x														
TORI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
TRDS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
VAAS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
VARS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
VIL0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
VIS0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
VLNS	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
WARN	x	x	x	x	x	x	x	x								

B priedas. Punktu erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs

B.1 lentelē. Erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs (2004 m.)

Table B.1. Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2004)

Punkto pavadinimas	Punktu koordinātēs, m		
	X_{2004}	Y_{2004}	Z_{2004}
BOR1	3738358,479	1148173,695	5021815,758
HELG	3706067,208	513803,859	5148174,450
LAMA	3524522,947	1329693,613	5129846,329
MAR6	2998189,437	931451,764	5533398,664
METS	2892570,815	1311843,432	5512634,122
OSLS	3169981,906	579956,759	5485936,681
POTS	3800689,655	882077,372	5028791,300
RIGA	3183899,224	1421478,478	5322810,785
SASS	3606146,095	875303,329	5170193,923
SULD	3446394,229	591713,129	5316383,446
VIS0	3246470,278	1077900,497	5365278,086
VLNS	3343600,641	1580417,727	5179337,279

B.2 lentelē. Erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs (2005 m.)

Table B.2. Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2005)

Punkto pavadinimas	Punktu koordinātēs, m		
	X_{2005}	Y_{2005}	Z_{2005}
BOR1	3738358,461	1148173,712	5021815,764
HELG	3706067,182	513803,873	5148174,443
LAMA	3524522,928	1329693,628	5129846,335
MAR6	2998189,427	931451,781	5533398,683
METS	2892570,804	1311843,447	5512634,135
OSLS	3169981,888	579956,774	5485936,682
POTS	3800689,645	882077,388	5028791,313
RIGA	3183899,209	1421478,494	5322810,796
SASS	3606146,082	875303,346	5170193,934
SULD	3446394,211	591713,145	5316383,447
VIS0	3246470,264	1077900,514	5365278,097
VLNS	3343600,629	1580417,740	5179337,291

B.3 lentelė. Erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės (2006 m.)**Table B.3.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2006)

Punkto pavadinimas	Punktų koordinatės, m		
	X_{2006}	Y_{2006}	Z_{2006}
BOR1	3738358,452	1148173,728	5021815,780
HELG	3706067,178	513803,890	5148174,464
LAMA	nematuota	nematuota	nematuota
MAR6	2998189,413	931451,793	5533398,691
METS	2892570,786	1311843,459	5512634,141
OSLS	3169981,874	579956,788	5485936,692
POTS	3800689,629	882077,403	5028791,319
RIGA	3183899,184	1421478,512	5322810,797
SASS	3606146,068	875303,359	5170193,941
SULD	3446394,201	591713,164	5316383,460
VIS0	3246470,249	1077900,527	5365278,104
VLNS	3343600,608	1580417,754	5179337,290

B.4 lentelė. Erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės (2007 m.)**Table B.4.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2007)

Punkto pavadinimas	Punktų koordinatės, m		
	X_{2007}	Y_{2007}	Z_{2007}
BOR1	3738358,421	1148173,743	5021815,793
HELG	3706067,153	513803,902	5148174,484
LAMA	3524522,882	1329693,657	5129846,357
MAR6	2998189,383	931451,805	5533398,707
METS	2892570,753	1311843,474	5512634,157
OSLS	3169981,849	579956,801	5485936,709
POTS	3800689,607	882077,419	5028791,341
RIGA	3183899,159	1421478,520	5322810,817
SASS	3606146,048	875303,376	5170193,971
SULD	3446394,173	591713,175	5316383,476
VIS0	3246470,219	1077900,541	5365278,118
VLNS	3343600,579	1580417,769	5179337,311

B.5 lentelē. Erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs (2008 m.)**Table B.5.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2008)

Punkto pavadinimas	Punktu koordinātēs, m		
	X_{2008}	Y_{2008}	Z_{2008}
BOR1	3738358,405	1148173,758	5021815,802
HELG	3706067,143	513803,918	5148174,498
LAMA	3524522,870	1329693,672	5129846,377
MAR6	2998189,375	931451,820	5533398,724
METS	2892570,738	1311843,489	5512634,168
OSLS	3169981,842	579956,814	5485936,728
POTS	3800689,591	882077,434	5028791,349
RIGA	3183899,141	1421478,534	5322810,823
SASS	3606146,035	875303,392	5170193,982
SULD	3446394,163	591713,190	5316383,488
VIS0	3246470,207	1077900,556	5365278,132
VLNS	3343600,560	1580417,783	5179337,316

B.6 lentelē. Erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs (2009 m.)**Table B.6.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2009)

Punkto pavadinimas	Punktu koordinātēs, m		
	X_{2009}	Y_{2009}	Z_{2009}
BOR1	3738358,385	1148173,771	5021815,807
HELG	3706067,129	513803,933	5148174,511
LAMA	3524522,852	1329693,686	5129846,387
MAR6	2998189,362	931451,832	5533398,740
METS	2892570,723	1311843,503	5512634,18
OSLS	3169981,820	579956,823	5485936,730
POTS	3800689,576	882077,445	5028791,362
RIGA	3183899,124	1421478,547	5322810,833
SASS	3606146,018	875303,406	5170193,988
SULD	3446394,150	591713,205	5316383,498
VIS0	3246470,192	1077900,571	5365278,142
VLNS	3343600,542	1580417,797	5179337,323

B.7 lentelė. Erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės (2010 m.)**Table B.7.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2010)

Punkto pavadinimas	Punktų koordinatės, m		
	X_{2010}	Y_{2010}	Z_{2010}
BOR1	3738358,366	1148173,786	5021815,81
HELG	3706067,115	513803,95	5148174,521
LAMA	3524522,834	1329693,701	5129846,395
MAR6	2998189,343	931451,851	5533398,743
METS	2892570,702	1311843,516	5512634,183
OSLS	3169981,806	579956,837	5485936,74
POTS	3800689,549	882077,461	5028791,357
RIGA	3183899,105	1421478,561	5322810,837
SASS	3606145,999	875303,421	5170193,993
SULD	3446394,135	591713,222	5316383,504
VIS0	3246470,177	1077900,585	5365278,152
VLNS	3343600,518	1580417,81	5179337,325

B.8 lentelė. Erdvinės stačiakampės ekvatorinės geocentrinės koordinatės (2011 m.)**Table B.8.** Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2011)

Punkto pavadinimas	Punktų koordinatės, m		
	X_{2011}	Y_{2011}	Z_{2011}
BOR1	3738358,352	1148173,802	5021815,825
HELG	3706067,099	513803,965	5148174,531
LAMA	3524522,820	1329693,717	5129846,401
MAR6	2998189,338	931451,867	5533398,780
METS	2892570,671	1311843,517	5512634,175
OSLS	3169981,797	579956,851	5485936,759
POTS	3800689,537	882077,478	5028791,370
RIGA	3183899,082	1421478,570	5322810,840
SASS	3606145,986	875303,436	5170194,005
SULD	3446394,123	591713,234	5316383,518
VIS0	3246470,163	1077900,599	5365278,164
VLNS	3343600,501	1580417,822	5179337,333

B.9 lentelē. Erdvinēs stačiakampēs ekvatorinēs geocentrinēs koordinātēs (2012 m.)
Table B.9. Spatial rectangular equatorial geocentric coordinates (2012)

Punkto pavadinimas	Punktu koordinātēs, m		
	X_{2012}	Y_{2012}	Z_{2012}
BOR1	3738358,332	1148173,819	5021815,833
HELG	3706067,081	513803,983	5148174,537
LAMA	3524522,797	1329693,730	5129846,413
MAR6	2998189,319	931451,878	5533398,774
METS	2892570,670	1311843,548	5512634,178
OSLS	3169981,788	579956,867	5485936,778
POTS	3800689,522	882077,497	5028791,388
RIGA	3183899,068	1421478,588	5322810,856
SASS	3606145,963	875303,454	5170194,007
SULD	3446394,104	591713,251	5316383,524
VIS0	3246470,141	1077900,614	5365278,165
VLNS	3343600,483	1580417,839	5179337,347

C priedas. Punktų horizontalinės koordinatės ir standartinis nuokrypis

C.1 lentelė. Horizontalinės koordinatės ir standartinis nuokrypis

Table C.1. Horizontal coordinates and standard deviation

Punktas		Koordinatės, m (2004 m.)	Standartinis nuokrypis, m (2004 m.)	Koordinatės, m (2012 m.)	Standartinis nuokrypis, m (2012 m.)
BOR1	X	-427601,4397	0,0000	-427601,3764	0,0001
BOR1	Y	-377964,0586	0,0000	-377963,8678	-0,0001
BOR1	Z	197886,0129	0,0000	197886,0610	0,0001
HELG	X	-133358,5866	0,0022	-133358,5161	0,0001
HELG	Y	-690092,0818	-0,0015	-690091,9079	-0,0001
HELG	Z	-287326,9046	0,0025	-287326,8424	0,0001
LAMA	X	-337346,1391	0,0024	-337346,0647	0,0001
LAMA	Y	-100189,9986	-0,0014	-100189,8092	0,0000
LAMA	Z	268887,9289	0,0031	268887,9729	0,0002
MAR6	X	240400,7327	0,0027	240400,8273	0,0001
MAR6	Y	131400,5328	-0,0012	131400,6943	0,0000
MAR6	Z	-190516,4667	0,0028	-190516,4006	0,0002
METS	X	137235,4774	0,0035	137235,5240	0,0001
METS	Y	424152,4823	-0,0014	424152,6674	0,0000
METS	Z	54304,9104	0,0037	54304,9472	0,0002
OSLS	X	259966,0997	0,0030	259966,1829	0,0001
OSLS	Y	-201796,4869	-0,0015	-201796,3292	-0,0001
OSLS	Z	-400065,9190	0,0030	-400065,8614	0,0002
POTS	X	-360651,6332	0,0000	-360651,5606	0,0001
POTS	Y	-572993,6576	0,0000	-572993,4779	-0,0001
POTS	Z	18380,3972	0,0000	18380,4577	0,0001
RIGA	X	-121219,6313	0,0028	-121219,5665	0,0001
RIGA	Y	236687,4869	-0,0014	236687,6778	0,0000
RIGA	Z	230324,2759	0,0032	230324,3065	0,0002
SASS	X	-191850,6342	0,0031	-191850,5653	0,0001

C.1 lentelės pabaiga

SASS	Y	-412261,5119	-0,0019	-412261,3340	0,0000
SASS	Z	-41278,5190	0,0036	-41278,4596	0,0002
SULD	X	49319,7447	0,0009	49319,8069	0,0001
SULD	Y	-429028,2129	0,0021	-429028,0428	0,0000
SULD	Z	-303711,6786	0,0085	-303711,6192	0,0002
VIS0	X	0,0000	0,0026	0,0675	0,0001
VIS0	Y	0,0000	-0,0014	0,1786	0,0000
VIS0	Z	0,0000	0,0029	0,0488	0,0002
VLNS	X	-326620,1865	0,0025	-326620,1243	0,0001
VLNS	Y	186804,4563	-0,0013	186804,6496	0,0000
VLNS	Z	393643,5014	0,0032	393643,5322	0,0002
JOEN	X	256595,7968	0,0034	256595,8806	0,0001
JOEN	Y	794881,4609	-0,0015	794881,6427	0,0000
JOEN	Z	63945,0325	0,0038	63945,0732	0,0002
VAAS	X	369928,1390	0,0030	369928,2450	0,0001
VAAS	Y	461984,2542	-0,0014	461984,4162	0,0000
VAAS	Z	-185002,6693	0,0031	-185002,6023	0,0002
TRDS	X	519804,1610	0,0014	519804,2765	0,0001
TRDS	Y	58170,8396	0,0023	58170,9644	0,0000
TRDS	Z	-570171,8095	0,0030	-570171,7637	0,0002
SKE0	X	514554,4132	0,0029	514554,5299	0,0001
SKE0	Y	546929,3089	-0,0015	546929,4667	-0,0001
SKE0	Z	-322240,8248	0,0032	-322240,7651	0,0002

D priedas. Žemės plutos judesių tyrimo Lietuvos teritorijoje rezultatai

D.1 lentelė. Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų rodikliai Lietuvoje

Table D.1. Indications of horizontal movements of the Earth's crust in Lithuania

Nr.	$D_1 \cdot 10^{-7}$	$D_2 \cdot 10^{-7}$	φ°	ω''	$\Delta \cdot 10^{-7}$	$E_1 \cdot 10^{-7}$	$E_2 \cdot 10^{-7}$	$E \cdot 10^{-7}$
1	3,49	-2,74	7	0,01	0,75	-6,05	1,49	6,23
2	4,77	-7,57	18	0,08	-2,79	-10,10	7,13	12,30
3	3,94	-6,16	17	0,10	-2,23	-8,45	5,53	10,10
4	7,91	1,42	86	-0,01	9,33	6,41	10,00	6,49
5	6,05	-3,44	125	0,07	2,61	3,25	-8,91	9,49
6	2,56	-2,95	125	0,10	-0,39	1,84	-5,19	5,51
7	3,36	-4,07	-30	0,04	-0,71	-3,77	-6,41	7,43
8	0,59	-3,28	0	0,02	-2,69	-3,87	-0,02	3,87
9	1,03	-3,07	-8	0,03	-2,04	-3,94	-1,15	4,10
10	2,87	-2,74	7	0,01	0,13	-5,46	1,30	5,61
11	3,03	-0,12	-2	0,02	2,91	-3,14	-0,26	3,15
12	0,30	-4,01	116	0,02	-3,71	2,71	-3,35	4,31
13	0,44	-3,17	68	-0,04	-2,74	2,59	2,52	3,61
14	1,58	-3,15	-6	0,04	-1,57	-4,64	-0,93	4,73
15	0,99	-8,38	-37	0,10	-7,39	-2,69	-8,98	9,37
16	-2,53	-3,97	-43	0,02	-6,51	-0,05	-1,44	1,44
17	2,04	-8,74	131	0,05	-6,69	1,61	-10,70	10,80
18	2,10	-0,66	26	-0,05	1,44	-1,74	2,15	2,76
19	2,96	-2,61	5	-0,02	0,34	-5,48	0,99	5,57
20	2,28	-3,62	-15	0,02	-1,34	-5,11	-2,95	5,90
21	-2,48	-3,88	46	0,04	-6,36	-0,04	-1,40	1,40
22	0,79	-4,28	106	0,07	-3,48	4,28	-2,72	5,07
23	3,93	-3,93	120	0,05	-16,0	4,03	-6,75	7,86
24	0,84	-3,11	0	-0,05	-2,27	-3,95	-0,00	3,95
25	2,70	-1,99	-20	-0,05	0,71	-3,64	-2,96	4,69
26	0,44	-2,43	48	0,02	-1,99	0,35	2,84	2,86
27	0,59	-0,36	110	0,04	0,23	0,72	-0,62	0,95
28	0,61	-5,28	109	0,04	-4,67	4,67	-3,59	5,89
29	0,47	-5,14	107	0,03	-4,67	4,67	-3,10	5,61
30	-1,11	-4,58	103	0,05	-5,69	3,14	-1,48	3,47
31	5,73	-4,51	89	0,03	1,22	10,20	0,47	10,20
32	3,44	-0,73	103	0,10	2,71	3,73	-1,84	4,16
33	0,60	-6,50	5	0,02	-5,90	-7,00	1,20	7,10
34	0,45	-6,45	0	0,01	-6,00	-6,90	0,07	6,90
35	-0,16	-4,16	-3	0,04	-4,32	-3,98	-0,41	4,00

D.1 lentelės pabaiga

36	2,89	0,26	104	0,05	3,15	2,32	-1,24	2,63
37	2,57	-2,41	120	0,05	0,16	2,47	-4,31	4,97
38	1,97	-1,67	-40	0,08	0,30	-0,61	-3,58	3,63
39	0,60	-2,86	15	0,02	-2,26	-3,00	1,71	3,46
40	-0,37	-1,42	29	0,05	-1,80	-0,55	0,89	1,05
41	4,39	-0,76	124	0,02	3,64	1,87	-4,80	5,15
42	1,07	-1,70	5	-0,04	-0,63	-2,73	0,47	2,77
43	-0,17	-3,68	102	0,02	-3,85	3,21	-1,40	3,50
44	-2,91	-3,45	65	-0,01	-6,36	0,34	0,41	0,53
45	-2,95	-3,19	-24	-0,01	-6,14	-0,16	-0,18	0,23
46	-1,19	-3,04	96	-0,02	-4,23	1,81	-0,40	1,85
47	-1,69	-3,73	133	-0,04	-5,42	0,12	-2,03	2,03
48	2,57	-3,09	104	-0,03	-0,53	4,99	-2,68	5,66
49	0,50	-2,12	107	0,00	-1,62	2,15	-1,50	2,62
50	0,97	-2,92	123	0,02	-1,95	1,62	-3,53	3,88
51	4,61	-4,30	-31	0,09	0,31	-4,09	-7,91	8,91
52	6,98	-2,36	24	-0,06	4,61	-6,36	6,84	9,34
53	0,14	-5,03	72	-0,01	-4,88	4,21	3,01	5,17
54	1,21	-5,74	128	0,12	-4,53	1,74	-6,72	6,94
55	1,64	-1,34	50	0,04	0,30	0,48	2,93	2,97
56	1,89	-1,08	80	0,01	0,82	2,78	1,05	2,97
57	-0,70	-2,18	25	0,01	-2,88	-0,96	1,13	1,48
58	-0,44	-2,46	18	0,00	-2,90	-1,64	1,18	2,02
59	-0,56	-3,86	-10	0,03	-4,41	-3,09	-1,15	3,30
60	0,41	-3,60	36	0,08	-3,19	-1,25	3,82	4,02
61	2,93	-2,43	71	0,04	0,51	4,20	3,32	5,36
62	-0,33	-2,51	46	0,01	-2,85	0,07	2,18	2,18
63	4,47	-1,01	111	0,05	3,46	4,06	-3,69	5,49
64	3,34	-1,58	79	-0,05	1,76	4,59	1,76	4,91
65	0,97	-1,23	-18	0,02	-0,27	-1,80	-1,26	2,20
66	0,69	-1,39	-29	0,03	-0,70	-1,11	-1,76	2,08
67	-0,74	-3,02	104	0,02	-3,76	2,00	-1,09	2,27
68	-1,30	-2,70	49	-0,01	-4,00	0,19	1,39	1,40
69	-0,81	-1,83	125	0,01	-2,64	0,34	-0,96	1,02

D.2 lentelė. Žemės plutos geodinaminių įtempių pokyčiai Lietuvoje
Table D.2. Changes of Earth's crust geodynamic stresses in Lithuania

Nr.	σ_{xx} , MPa	σ_{yy} , MPa	σ_{xy} , MPa	Nr.	σ_{xx} , MPa	σ_{yy} , MPa	σ_{xy} , MPa
1	-0,013	0,020	0,006	36	0,021	0,008	0,009
2	-0,041	0,015	0,032	37	0,008	-0,006	0,000
3	-0,034	0,013	0,033	38	0,000	0,003	0,009
4	0,061	0,026	0,000	39	-0,019	-0,002	0,009
5	0,021	0,003	-0,004	40	-0,010	-0,007	0,013
6	0,003	-0,007	0,010	41	0,022	0,012	-0,006
7	-0,014	0,007	-0,005	42	-0,011	0,005	-0,007
8	-0,023	-0,002	0,005	43	-0,009	-0,027	0,001
9	-0,021	0,001	0,005	44	-0,029	-0,031	0,000
10	-0,015	0,016	0,006	45	-0,029	-0,028	-0,003
11	0,005	0,022	0,003	46	-0,015	-0,025	-0,005
12	-0,010	-0,025	-0,004	47	-0,025	-0,026	-0,013
13	-0,006	-0,020	-0,003	48	0,012	-0,016	-0,013
14	-0,020	0,006	0,006	49	-0,002	-0,014	-0,004
15	-0,042	-0,027	0,002	50	-0,005	-0,014	-0,004
16	-0,031	-0,030	0,001	51	-0,010	0,013	0,001
17	-0,027	-0,036	-0,012	52	0,004	0,039	0,002
18	0,002	0,012	-0,007	53	-0,011	-0,035	0,004
19	-0,014	0,017	-0,001	54	-0,016	-0,026	0,011
20	-0,021	0,008	-0,002	55	0,003	0,000	0,014
21	-0,030	-0,030	0,005	56	0,012	-0,004	0,003
22	-0,004	-0,028	0,010	57	-0,016	-0,011	0,005
23	0,011	-0,011	-0,003	58	-0,018	-0,009	0,004
24	-0,022	0,000	-0,011	59	-0,029	-0,012	0,003
25	-0,007	0,014	-0,017	60	-0,018	-0,011	0,026
26	-0,008	-0,010	0,010	61	0,014	-0,009	0,016
27	0,003	-0,001	0,008	62	-0,013	-0,013	0,007
28	-0,009	-0,035	0,000	63	0,028	0,005	0,002
29	-0,009	-0,035	0,000	64	0,021	-0,005	-0,006
30	-0,018	-0,035	0,008	65	-0,006	0,004	0,002
31	0,034	-0,023	0,007	66	-0,006	0,000	0,003
32	0,023	0,002	0,016	67	-0,012	-0,023	0,002
33	-0,047	-0,008	0,007	68	-0,018	-0,019	0,001
34	-0,047	-0,009	0,002	69	-0,011	-0,013	0,000
35	-0,031	-0,009	0,007				

D.3 lentelė. Svarbiausiųjų įtempių pokyčiai Lietuvoje**Table D.3.** Changes of most significant stresses in Lithuania

Nr.	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	Nr.	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	Nr.	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa
1	0,149	0,456	24	-0,426	0,350	47	-0,474	-0,068
2	-1,012	0,733	25	-0,312	0,383	48	-0,393	0,340
3	-0,807	0,584	26	-0,547	0,348	49	-0,278	0,063
4	0,131	0,802	27	-0,258	0,061	50	-0,460	0,264
5	-0,955	0,929	28	-0,662	0,195	51	-0,802	0,833
6	-0,550	0,505	29	-0,622	0,155	52	-0,523	0,985
7	-0,704	0,633	30	-0,500	-0,069	53	-0,596	0,106
8	-0,328	0,059	31	-0,453	0,575	54	-0,905	0,451
9	-0,331	0,127	32	-0,550	0,361	55	-0,297	0,327
10	-0,296	0,309	33	-0,729	0,633	56	-0,099	0,181
11	-0,013	0,305	34	-0,976	0,177	57	-0,195	-0,093
12	-0,830	-0,248	35	-0,472	-0,084	58	-0,229	-0,061
13	-0,420	0,146	36	-0,241	-0,140	59	-0,376	-0,065
14	-0,329	0,171	37	-0,440	0,456	60	-0,652	0,333
15	-1,278	0,539	38	-0,209	0,647	61	-0,248	0,299
16	-0,470	-0,181	39	-0,306	0,416	62	-0,166	-0,119
17	-1,404	0,735	40	-0,183	0,004	63	-0,030	0,376
18	-0,160	0,304	41	-0,308	0,671	64	-0,800	1,221
19	-0,274	0,308	42	-0,383	0,489	65	-0,489	1,225
20	-0,458	0,324	43	-0,405	0,020	66	-0,102	0,032
21	-0,458	-0,178	44	-0,362	-0,274	67	-0,186	-0,017
22	-0,537	0,109	45	-0,324	-0,290	68	-0,391	-0,010
23	-0,876	0,474	46	-0,310	-0,113	69	-0,285	0,021

Daiva LEVINSKAITĖ

ŽEMĖS PLOTOS DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIŲ TYRIMAS GEODEZINIAIS
METODAIS (BALTIJOS REGIONO PAVYZDŽIU)

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
matavimų inžinerija (10T)

RESEARCH OF EARTH'S CRUST STRAINS AND STRESSES BY GEODETIC
METHOD (BALTIC REGION EXAMPLE)

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2012 12 17. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, LT-01111 Vilnius